INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MONUMENTO AZTECA

Octubre 1984

350 PTAS.

Número 97
Octubre 1984

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Efectos climáticos de una guerra nuclear* y *Objeto superluminoso en la Gran Nube de Magallanes*; Santiago Torres Martínez: *Proteínas de oncogenes*; Elías Zamora Acosta: *El Templo Mayor de Tenochtitlán*; Carlos Vicente Córdoba: *Fibras ópticas en vegetales*; Heliodoro Ruipérez García: *Manipulación mecánica de partes aleatoriamente orientadas*; Joandomènec Ros: *Reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel Ballester y Enrique Julve

Libros:

Juan-Ramón Lacadena, Ramón Pascual, José A. López Cerezo y José Font Cierco



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra la Piedra de Coyolxauhqui, un enorme disco de piedra esculpido que fue descubierto en la excavación del Templo Mayor de Tenochtitlán, en la ciudad de México (véase "El Templo Mayor de Tenochtitlán", por Eduardo Matos Moctezuma). El Templo Mayor fue un monumento azteca dedicado a Huitzilopochtli, el dios de la guerra, y a Tlaloc, el dios del agua; fue destruido por los españoles tras la conquista del imperio azteca y de su capital Tenochtitlán. De acuerdo con la mitología azteca, Coyolxauhqui era hermana de Huitzilopochtli, quien la mató tras una batalla que tuvo lugar en el cerro de Coatepec. El disco, que mide 3 metros y 25 centímetros de diámetro, muestra el cuerpo desmembrado de la diosa. Cuando se descubrió, el disco estaba roto en dos partes; en el dibujo la fractura ha sido eliminada.

Suscripciones:

Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029-Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace. S. A.
Bruch, 49 - 08009-Barcelona

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029-Barcelona

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030-Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - 08034-Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

OJD DIFUSION PUBLICIDAD

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente	Página	Fuente
7-16	Ian Worpole		Arbel (*abajo*)
21-22	F. Cortés Benavides	56-58	Ilil Arbel
23-25	F. Cortés y Ricardo Génova	63-64	Instituto Nacional de Antropología e Historia de México
26	F. Cortés		
27	F. Cortés y Ricardo Génova	65-66	Patricia J. Wynne
		67	Emily Umberger
28	F. Cortés	68	Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (*arriba*); José A. Naranjo, Galería Nacional de Arte (*abajo*)
29	F. Cortés y Ricardo Génova		
31	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli, Universidad de Wisconsin en Madison	69-71	José A. Naranjo, Galería Nacional de Arte
32	Observatorio Interamericano de Cerro Tololo	75	Dina F. Mandoli y Winslow R. Briggs
33	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli	76	Ian Worpole
		77-82	Tom Prentiss
		85	Hank Iken, Walken Graphics
34-37	Allen Beechel	86-87	Gabor Kiss
38	John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli	88-89	Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi, Instituto de Tecnología de Massachusetts
49	G. Steven Martin, Universidad de California en Berkeley	90-94	Gabor Kiss
		97	Walter D. Koenig, Universidad de California en Berkeley
50-53	Ilil Arbel		
54	Ilil Arbel (*arriba*); Tony Hunter, Instituto Salk de Estudios Biológicos (*abajo*)	98-104	Patricia J. Wynne
		107-111	Alan D. Iselin
55	Ilil Arbel (*arriba, izquierda*); Tony Hunter (*arriba, derecha*); Ilil	112	R. F. Bonifield
		113	Lorne A. Whitehead
		114-118	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005-Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013-Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

RICHARD P. TURCO, OWEN B. TOON, THOMAS P. ACKERMAN, JAMES B. POLLACK y CARL SAGAN ("Efectos climáticos de una guerra nuclear") integran un grupo que ha venido trabajando durante los últimos años en los efectos de la guerra atómica. Turco es director científico de proyectos de R & D Associates Inc. Licenciado por la Universidad de Rutgers, en 1965, se doctoró en ingeniería eléctrica y en física por la de Illinois. Investigador de la atmósfera, su interés se centra en el estudio de las consecuencias a largo plazo de las perturbaciones. Toon, Ackerman y Pollack están adscritos al Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). A los tres les preocupan las consecuencias que pueden derivarse de la inyección de materia en forma de partículas en las atmósferas planetarias. Sagan es titular de la cátedra Duncan de astronomía y ciencias espaciales de la Universidad de Cornell. Se formó en la de Chicago, doctorándose en astronomía. Enseñó en la Universidad de Harvard antes de trasladarse a Cornell.

FELIPE CORTES ("Bandeo de cromosomas") enseña citología e histología en la Facultad de Biología de la Universidad de Sevilla, en cuyo centro superior inició su formación, que culminó con el grado de doctor en la Universidad Autónoma de Madrid (1977). Tras varios años de docencia en esta última, volvió a Sevilla con las oposiciones ganadas.

JOHN S. MATHIS, BLAIR D. SAVAGE y JOSEPH P. CASSINELLI ("Objeto superluminoso en la Gran Nube de Magallanes") enseñan astronomía en la Universidad de Wisconsin en Madison. Mathis cursó físicas en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se recibió de doctor en astronomía por el de California. Tras dos años en el cuerpo docente de la Universidad estatal de Michigan se trasladó a Wisconsin. En 1968 le llegó el nombramiento de catedrático. Savage estudió en la Universidad Cornell, doctorándose por la de Princeton. En ese centro investigó un año, ingresando en 1968 en Wisconsin, de la que es profesor desde 1978. Cassinelli siguió el primer ciclo en la Universidad Xavier; licenciado en física por la Universidad de Arizona, se doctoró en astronomía por la de Washington. Adjunto de investigación durante dos años en el Instituto Conjunto de Astrofísica de Laboratorio, se trasladó a Wisconsin en 1972; accedió a la cátedra en 1981.

TONY HUNTER ("Proteínas de oncogenes"). "Mi interés por la biología, comenta el autor, nace de mi educación en el seno de una familia de médicos. Estudié ciencias naturales en la Universidad de Cambridge, por la que me licencié y doctoré. Disfruté de una beca de investigación del Christ College de Cambridge, gracias a la cual trabajé en el departamento de bioquímica desde 1968 hasta 1971. Me trasladé entonces al Instituto Salk de San Diego, donde, durante dos años, me dediqué al mecanismo de síntesis de ADN en células animales utilizando el virus polioma como modelo. Fue mi primer contacto con los virus cancerígenos, y desde entonces estoy con ellos. Volví al Instituto Salk en 1975, donde ejerzo como profesor desde 1982."

EDUARDO MATOS MOCTEZUMA ("El Templo Mayor de Tenochtitlán") es director general del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social de Tlalpán, México. Obtuvo su grado de maestría en la Escuela Nacional de Antropología e Historia y prosiguió estudios de licenciatura durante varios años en la Universidad Nacional Autónoma de México. Matos ha llevado a cabo excavaciones en diversos lugares de cultura precolombina de México; la última excavación realizada bajo su supervisión es el objeto de este artículo.

DINA F. MANDOLI y WINSLOW R. BRIGGS ("Fibras ópticas en vegetales") han trabajado en colaboración sobre el tema aquí desarrollado. Mandoli es becaria postdoctoral del departamento de bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. Licenciada en 1976 por el Wellesley College, se doctoró en biología por Stanford con una tesis sobre fotofisiología y las propiedades de las fibras ópticas de las plantas. Briggs dirige el departamento de biología vegetal de la Institución Carnegie de Washington. Se recibió de doctor en biología por la Universidad de Harvard, tras lo cual se vinculó a la facultad de Stanford, de la que fue profesor de biología. Volvió a Harvard para enseñar la misma disciplina en 1967. En 1974 entró en la Institución Carnegie.

BERTHOLD K. P. HORN y KATSUSHI IKEUCHI ("Manipulación mecánica de partes orientadas aleatoriamente") realizaron el trabajo sobre el que versa su artículo cuando ambos se encontraban en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Horn, nacido en Sudáfrica, escribe: "Recibí mi primer título en ingeniería eléctrica por la Universidad de Witwatersrand. Me trasladé luego al MIT, donde participé en la investigación sobre robots prácticamente desde que se iniciara ese programa en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, a finales de los años 60. Mi trabajo se ha centrado en máquinas de visión". Ikeuchi, japonés, se licenció en 1973 por la Universidad de Kyoto, por la que también es doctor en ingeniería de información (1978). Tras una estancia en los Estados Unidos, investigando durante dos años en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, volvió a Japón en 1980.

PETER B. STACEY y WALTER D. KOENIG ("Reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas") son zoólogos que, de forma independiente, están haciendo estudios a largo plazo sobre el sistema social de estas aves. Stacey se graduó en Middlebury College, y se licenció y doctoró por la Universidad de Colorado en Boulder. Pasó dos años de estudios postdoctorales en la Universidad de Chicago hasta ocupar el puesto que actualmente desempeña, de profesor ayudante de ciencias biológicas, en la Universidad estatal de Indiana. "En la facultad, Koenig escribe, abandoné pronto mi primera ilusión de llegar a ser astrónomo al tiempo que crecía mi atracción por la historia natural. A la hora de escoger tesis con que doctorarme decidí continuar un proyecto en marcha sobre el picamaderos de las bellotas en la reserva de historia natural de Hastings, del Museo de Zoología de los Vertebrados, que se encuentra en el Valle Superior del Carmel. Conseguido el grado, enseñé en el Occidental College durante un año y volví a Hastings en 1982, como zoólogo ayudante de investigación y profesor adjunto de zoología de la Universidad de Berkeley."

Hace...

José M.ª López Piñero

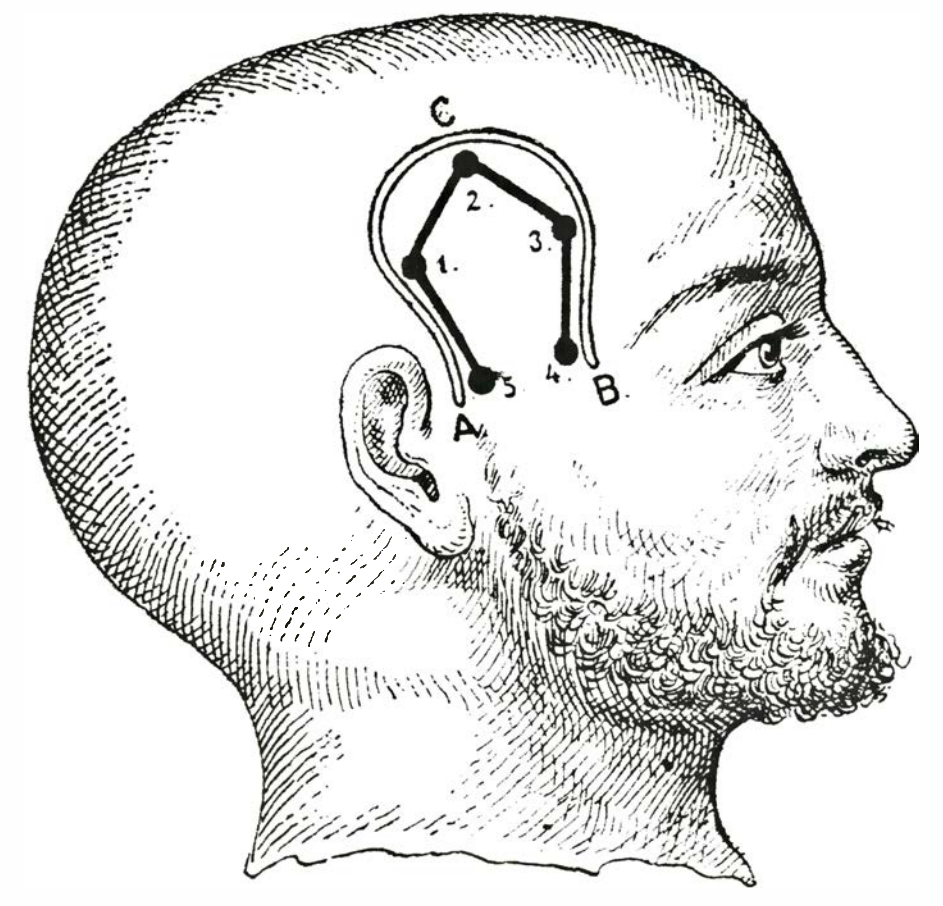
... cien años

Apareció el primer volumen del *Curso de Patología quirúrgica*, de Alejandro San Martín Satrústegui.

Nacido en la localidad navarra de Larrainzar en 1847, San Martín era hijo de un médico rural y cursó los tres primeros años de bachillerato en Pamplona. En 1860, se trasladó a Madrid, estando a partir de entonces bajo la tutela de su tío Basilio San Martín, prestigioso cirujano que, entre otras cosas, había sido uno de los introductores en España de la anestesia por inhalación. Tuvo, gracias a él, una cuidada formación. Tras terminar el bachillerato, estudió medicina con excepcional brillantez en la Facultad de Madrid, donde obtuvo el título de licenciado en 1869 y el de doctor el año siguiente.

Durante casi cuatro años, San Martín ejerció como médico en un pueblo navarro. En 1874, ganó por oposición la cátedra de terapéutica de la Facultad de Medicina de Cádiz. Aunque tenía gran inclinación por el trabajo experimental, se consagró a la cirugía, en parte por influencia de su tío. La culminación de su carrera fue conseguir, en 1882, la cátedra de patología quirúrgica de la Facultad de Madrid, que ocupó hasta su muerte.

San Martín participó activamente en aspectos muy variados de la vida médica y también de la política. Fue miembro de numerosas comisiones oficiales, entre ellas, la que el gobierno nombró en 1885 para dictaminar acerca de la vacunación anticolérica de Jaime Ferrán. Asistió a numerosos congresos nacionales y extranjeros, y perteneció a la Real Academia de Medicina y a otras instituciones. A partir de 1898 fue senador y, desde junio a diciembre de 1906, ocupó el cargo de ministro de Instrucción Pública.

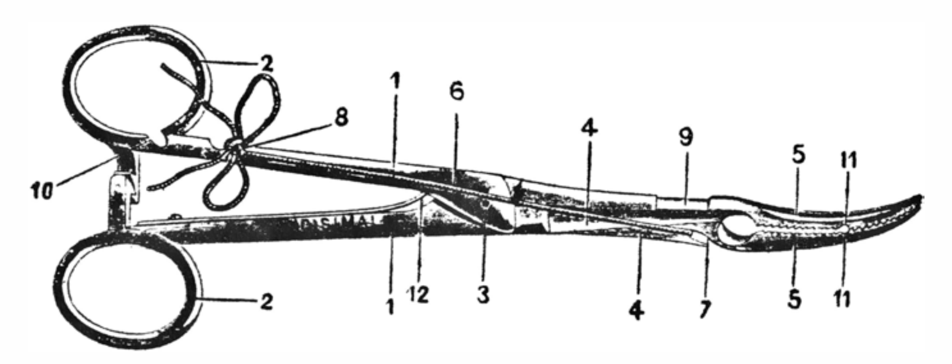


1. Esquema de la técnica de San Martín para "escisión esfenoidal de dentro afuera en la extirpación del ganglio de Gasser", en casos de neuralgia de trigémino.

Como cirujano, fue un típico seguidor de la mentalidad fisiopatológica. No sólo pensaba que la cirugía tenía una finalidad restauradora y funcional y no meramente exerética, sino que consideraba que su principal fundamento era la investigación de laboratorio. En consecuencia, realizó trabajos experimentales para solucionar problemas quirúrgicos.

Su importante contribución a la cirugía vascular es la que mejor refleja dicha mentalidad. El punto de partida de sus estudios sobre el tema fue, en 1898, la posibilidad de evitar la propagación de la gangrena de un miembro por endarteritis obliterante, mediante una anastomosis arteriovenosa que trasladara a la vena principal la sangre arterial que no podía llegar por la arteria obstruida. Teniendo en cuenta las especiales condiciones anatómicas y fisiológicas del árbol venoso, examinó su adaptación a la sangre arterial en los casos clínicos de aneurisma arteriovenoso, entre otros, los producidos en la flexura del codo por la picadura de la lanceta de los sangradores. Por otra parte, trabajó durante más de dos años en amplias series de experimentos en animales, investigando el comportamiento de anastomosis por invaginación de la arteria en la vena y de anastomosis laterolaterales. Las dos primeras aplicaciones al hombre de esta última técnica –que pareció la preferible– no consiguieron evitar la amputación, pero quedó abierto un camino que desarrollaría brillantemente José Goyanes Capdevila, su más destacado discípulo. En su *Cirugía del aparato circulatorio* (1902), San Martín concluyó que "la anastomosis arteriovenosa es una verdadera autotransfusión sanguínea o hemoplástica y se propone por ahora prevenir la muerte local inminente... en el porvenir, si el método prospera, habrá de ser aplicada, no tan sólo a los casos de asfixia, sino a los de pobreza hemática de regiones u órganos determinados".

Otro terreno en el que San Martín realizó notables aportaciones originales fue el tratamiento quirúrgico de las neuralgias faciales. Comenzó por efectuar resecciones del trigémino y de los nervios maxilares superior e inferior, e



2. Pinza-tijera de San Martín, destinada a las operaciones que exigen numerosas ligaduras vasculares, como la extirpación del bocio, la decolación del fémur, etc. Ejemplo de las innovaciones introducidas por el cirujano navarro en el instrumental quirúrgico.

ideó más tarde una técnica de "escisión esfenoidal de dentro afuera en la extirpación del ganglio de Gasser". La presentó primero en una comunicación al XIV Congreso Médico Internacional, celebrado en Madrid en 1903, y la describió luego en detalle en un artículo de 1905. Pensaba que su técnica ofrecía las seis ventajas siguientes:

"1.ª Agrandar en lo posible la brecha ósea temporo-zigomática, con el fin de que las inevitables compresiones encefálicas, durante la resección ganglionar, recaigan sobre una más amplia superficie, haciéndose menos graves, ya por repartirse en mayor campo, ya por serle posible al líquido cefalo-raquídeo rechazado acumularse libremente en la parte en que falta la rigidez craneal, evitando los efectos compresivos del líquido mismo en distintas zonas de los centros nerviosos.

"2.ª Conseguir puntos de referencia claros y precisos y disección no ciega de todo el ganglio de Gaserio, con el propósito de evitar desgarros durales así como lesiones vasculares y de los nervios del ojo.

"3.ª Dotar el foco operatorio de tal forma que impida la acumulación de sangre y líquido encefalo-raquídeo y permita operar sin suspensiones hemostásicas frecuentes que dificulten la más fina disección ganglionar.

"4.ª Lograr la mayor economía arterial, procurando la menor injuria a los plexos venosos y el más rápido aplastamiento de los vasillos seccionados.

"5.ª Reaplicar lo más exactamente posible el colgajo osteomusculocutáneo, evitando en él la descorticación perióstica exocraneal, tan frecuente, huyendo, al mismo tiempo, del empleo de la gubia, del escoplo y aún de la pinza gubia en la delgada zona esfenoidal, cuyo fino calado expone a su fractura por los golpes de aquellos instrumentos, con peligro de lesionar los órganos subyacentes.

"6.ª Ofrecer una craniectomía de la base, acaso aplicable a otras lesiones en que se halle indicado, bien un desagüe expedito subdural o subaracnoideo, bien una rebaja de la presión intracraneal...

"Posteriormente, he conocido el método operatorio de Lexer, de la clínica de E. von Bergmann, que me parece ventajoso por lo que significa la técnica, siquiera yo no haya tenido que lamentar necrosis ósea en craneotomías más extensas, a pesar de habérseme desprendido en el segundo caso descrito el opérculo óseo, que repuse inmediatamente sujetándolo mejor con gasa. En ninguno pude llegar a la raíz del ganglio ni a una disección tan amplia como la del Coelho, pero las dos piezas fueron examinadas por el profesor S. R. Cajal, que encontró en ellas la mayor parte de los elementos ganglionares".

Durante los últimos meses de su vida, San Martín estuvo ocupado en fundamentar con investigaciones anatómicas y fisiológicas otro procedimiento original de "neurectomía de la segunda rama del trigémino con orificación del agujero redondo mayor". Solamente llegó a publicar una comunicación preliminar, y los datos anatómicos procedentes de su estudio aparecieron como trabajo póstumo (1909).

Menor relieve tuvieron las demás novedades quirúrgicas debidas a San Martín. Recordaremos sólo sus métodos de resección de los maxilares superiores (1890), de amputación osteoplástica de las extremidades inferiores (1899) y de colostomía subespinosa (1903). Propuso mejoras en la anestesia, ideó modelos de pinzas para facilitar las ligaduras y fue un temprano difusor de la asepsia y de los rayos X.

Efectos climáticos de una guerra nuclear

Nuevos descubrimientos respaldan la posibilidad de que las inmensas nubes de humo y polvo que levantaría una guerra nuclear, siquiera de extensión media, provoquen un "invierno nuclear" generalizado

Richard P. Turco, Owen B. Toon, Thomas P. Ackerman, James B. Pollack y Carl Sagan

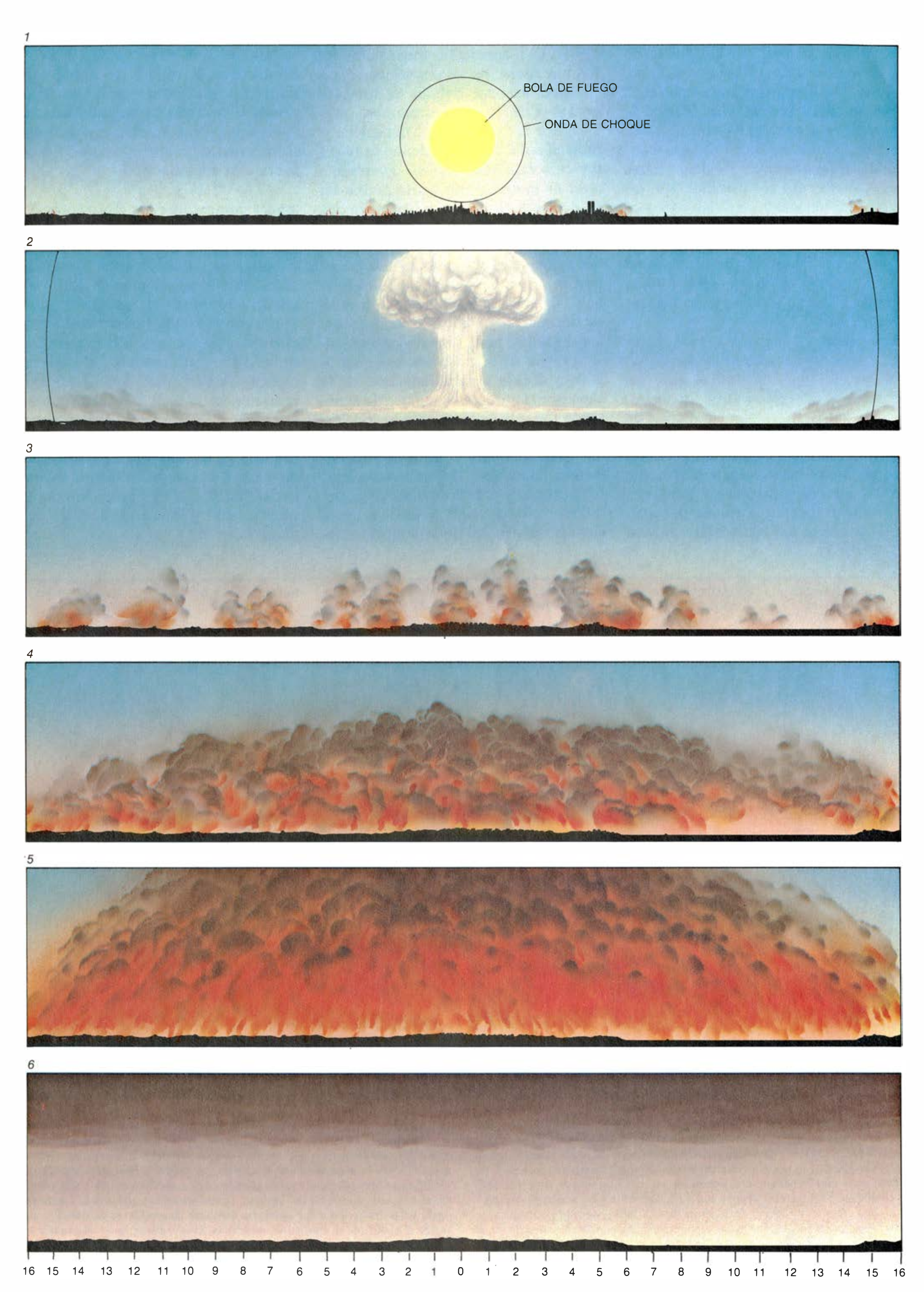
Desde el comienzo de la carrera de armamentos nucleares, hace cuatro decenios, se ha supuesto que la consecuencia más devastadora de una guerra atómica generalizada entre los Estados Unidos y la Unión Soviética sería el ingente número de víctimas humanas en los blancos principales del hemisferio Norte. Aunque, como secuela de tal guerra, se hundirían presumiblemente las estructuras sociales y económicas de los países contendientes, se ha afirmado que la mayoría de las naciones no involucradas –y, con ello, la mayor parte de la humanidad– no peligrarían ni directa ni indirectamente. En el transcurso de los años se ha planteado la posible extensión global de diversos efectos indirectos y a largo plazo de la guerra nuclear: precipitación radiactiva retardada, disminución de la capa protectora de ozono de la atmósfera superior y cambios adversos del clima. Hasta hace poco, no obstante, los contados estudios serios que han abordado esas amenazas han tendido a subestimar su importancia, en algunos casos poniendo énfasis en la incertidumbre inherente a cualquier intento de predecir los efectos combinados de explosiones nucleares múltiples.

Quizá haya llegado la hora de revisar ese punto de vista un tanto optimista del impacto global potencial de una guerra nuclear. Recientes descubrimientos de nuestro grupo, confirmados por investigadores de Europa, de los Estados Unidos y de la Unión Soviética, sugieren que los efectos climáticos a largo plazo de una guerra atómica a gran escala probablemente sean mucho más graves y de mayor alcance de cuanto se había supuesto. Por efecto de tal guerra, vastas regiones de la Tierra podrían quedar sometidas a prolongada oscuridad, temperaturas por debajo de lo común, violentos vendavales, brumas tóxicas y deposición radiactiva persistente: en una palabra, la combinación de condiciones que ha venido a denominarse "invierno nuclear". Los efectos físicos de la guerra atómica se agravarían por los daños generalizados en los sistemas de transporte, redes de distribución eléctrica, producción agraria, elaboración de alimentos, asistencia médica, higiene, servicios civiles y gobierno. Incluso en regiones alejadas del conflicto, los supervivientes padecerían el riesgo de inanición, hipotermia, enfermedades radiactivas, debilitamiento del sistema inmunológico, epidemias y otras horribles consecuencias. Bajo ciertas circunstancias, algunos biólogos, ecólogos en particular, afirman que la extinción de muchas especies de organismos (incluida la especie humana) es una posibilidad verosímil.

Nuestra participación en la nueva valoración de los efectos globales de una guerra nuclear partió de la confluencia de varias líneas de investigación. Antes de unir nuestras fuerzas, habíamos intervenido, individual o conjuntamente, en investigaciones sobre ciertos fenómenos: tempestades de polvo en Marte y efectos climáticos de las erupciones volcánicas en la Tierra; más recientemente, todos nos interesamos por la hipótesis según la cual una o más de las extinciones en masa de especies que se plasman en el registro geológico responderían a la generación de inmensas nubes de polvo por el impacto de un asteroide o de un cometa. En 1982, un comité de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, consciente del paralelismo existente entre el polvo levantado por explosiones nucleares y el que producen otros sucesos cataclísmicos, erupciones volcánicas e impactos meteoríticos, por ejemplo, nos propuso la investigación de los posibles efectos climáticos del polvo que probablemente resultaría de una guerra nuclear. Los autores ya habían tratado la cuestión, y para profundizar en ella tenían a su disposición complejos modelos de ordenador de fenómenos atmosféricos, a gran o pequeña escala; los modelos se habían elaborado a lo largo del decenio anterior, sobre todo, para estudiar los orígenes, propiedades y efectos de las partículas suspendidas en la atmósfera.

Por los mismos años, otro importante aspecto de la cuestión llamaba nues-

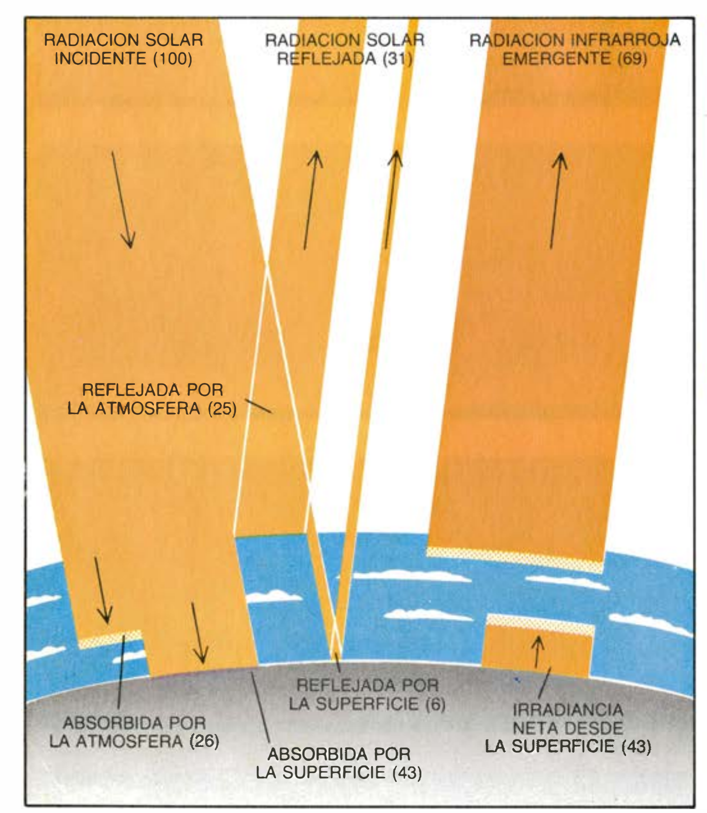
1. TEMPESTAD DE FUEGO formada tras una explosión de un megatón sobre el corazón de Nueva York, desarrollada en una secuencia hipotética de sucesos en la página opuesta (la silueta de la ciudad, vista desde el Oeste, se ha dibujado a escala; el punto de detonación se supone a 2000 metros encima mismo del Empire State Building). En los primeros segundos tras la detonación, el relámpago de radiación térmica emitido por la bola de fuego incendiaría espontáneamente materias combustibles que se encuentren incluso bastante distantes (*1*). La onda expansiva esférica (*arcos negros*) y los fuertes vientos que la acompañan sofocarían pronto muchos incendios, pero esos mismos efectos iniciarían también un gran número de incendios secundarios al destruir la mayoría de las estructuras de la ciudad (*2*). Algunos de los incendios aislados primarios y secundarios podrían combinarse en conflagraciones de importancia (*3*), que a su vez se unirían en un único y enorme fuego que cubriría la mayor parte de la ciudad (*4*). Si tal incendio fuera suficientemente intenso y las condiciones meteorológicas favorables, podría producirse una tempestad de fuego a gran escala, impulsada por vientos de 150 kilómetros por hora, o más, en la vecindad de la corriente ascendente central (*5*). El fuego acabaría agotándose, dejando un rescoldo residual (*6*). El humo y el polvo arrojados a la atmósfera por miles de tales explosiones podrían extenderse sobre una superficie considerable, cerrando el paso a la radiación solar y reduciendo drásticamente la temperatura en superficie, no importa cuál fuera la estación del año. En el caso base estudiado por los autores, una guerra nuclear de 5000 megatones, las tempestades de fuego urbanas inyectan en la estratosfera poco hollín; si tales tempestades de fuego fuesen corrientes en una guerra, el invierno nuclear resultante de la conflagración sería mucho más duro que el pronosticado por los modelos de ordenador.

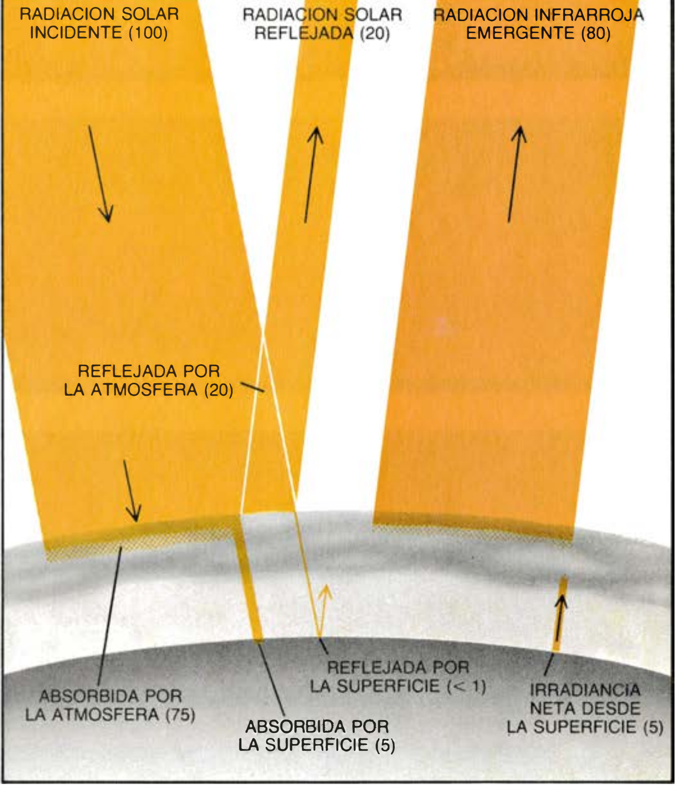

1
BOLA DE FUEGO
ONDA DE CHOQUE
2
3
4
5
6
16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
DISTANCIA DESDE EL PUNTO DE EXPLOSION (KILOMETROS)

tra atención. En un artículo publicado en la revista sueca del medio ambiente *Ambio*, del que eran autores Paul J. Crutzen, del Instituto Max Planck de Química de Maguncia (Alemania Occidental), y John W. Birks, de la Universidad de Colorado en Boulder, leíase que los incendios provocados por explosiones nucleares podrían originar enormes cantidades de humo, atenuando sensiblemente la luz solar que llega al suelo. En consecuencia, añadimos el humo al polvo como probable influencia perturbadora de una guerra nuclear sobre el clima.

En resumen, nuestros primeros resultados, publicados en *Science* en diciembre de 1983, mostraban que "las consecuencias potenciales globales, tanto atmosféricas como climáticas, de la guerra nuclear... son serias. El fino polvo levantado por potentes explosiones nucleares en superficie y el humo de los incendios urbanos y forestales provocados por explosiones de cualquier potencia en la atmósfera pueden causar una apreciable atenuación del flujo de radiación solar y temperaturas en superficie por debajo de los cero grados Celsius". Encontramos, además, que la exposición prolongada a la radiación nuclear procedente de la deposición radiactiva de una guerra nuclear en el hemisferio Norte podría ser un orden de magnitud mayor de lo que indicaban anteriores estudios; la radiactividad, como los otros efectos del invierno nuclear, podrían incluso penetrar profundamente en el hemisferio Sur. "Cuando se combinan con la rápida destrucción de la explosión nuclear, los incendios, la deposición y el aumento ulterior de la radiación solar ultravioleta debido al debilitamiento de la capa de ozono", concluíamos, "la exposición durante largo tiempo al frío, oscuridad y radiactividad podría suponer una seria amenaza contra los supervivientes humanos y de otras especies". Resultados de estudios posteriores, basados en modelos más potentes sobre la circulación general de la atmósfera terrestre, reflejaron una tendencia a confirmar tanto la validez del enfoque de nuestra investigación como la línea principal de nuestros descubrimientos. A continuación pasaremos revista al estado actual de nuestros conocimientos sobre esta cuestión vital.

Para comprender los efectos climáticos de una guerra nuclear debe primero analizarse cómo suele alcanzarse el balace de radiación en la Tierra. La cantidad de radiación solar absorbida por la atmósfera y la superficie de la Tierra, promediada para un período de tiempo largo, es igual a la cantidad de radiación térmica emitida y devuelta al espacio. Puesto que la intensidad de la radiación térmica varía en proporción a la cuarta potencia de la temperatura, tanto la temperatura de la superficie como la de la atmósfera pueden ajustarse con bastante rapidez para mantener el balance global entre la energía solar ganada y la energía térmica perdida.



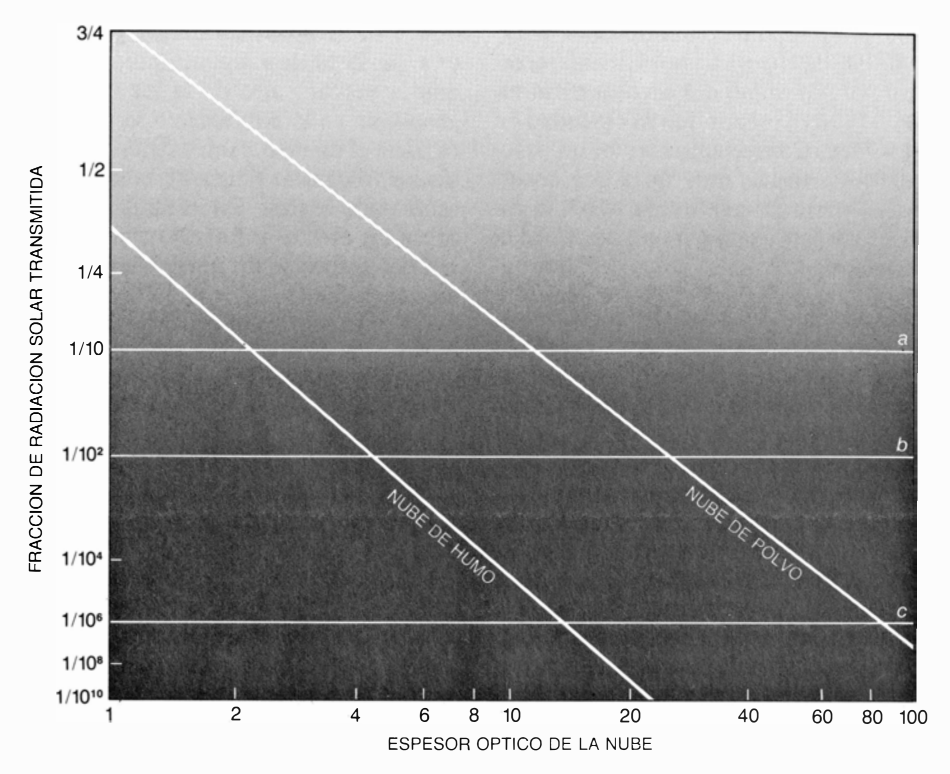


2. POR EL EFECTO DE INVERNADERO se calienta la superficie terrestre gracias a las propiedades aislantes de la atmósfera; dicho fenómeno se anularía a lo largo de una extensa superficie debido a la nube de humo y polvo generada por una guerra nuclear. Bajo condiciones normales (*izquierda*), la atmósfera es casi transparente a la radiación a las longitudes de onda visibles; en consecuencia, una gran proporción de la radiación solar incidente atraviesa la atmósfera y se absorbe en la superficie en forma de energía térmica, o calor. La radiación térmica de la superficie se emite predominantemente a longitudes de onda más largas, en el infrarrojo; la baja atmósfera las absorbe, elevando la temperatura cerca del suelo hasta unos valores muy por encima del punto de fusión del hielo. En condiciones normales, el balance neto de calor en el suelo es la diferencia entre una irradiancia infrarroja hacia abajo de 101 unidades y una irradiancia hacia arriba de 144 unidades; este último valor se descompone, a su vez, en una irradiancia infrarroja hacia arriba de 115 unidades más un flujo de calor "sensible" y latente que totaliza 29 unidades. La energía absorbida por la atmósfera y la superficie en forma de radiación solar, promediada a lo largo del tiempo, es igual a la energía devuelta al espacio desde la superficie y la atmósfera en forma de radiación infrarroja. Una densa nube de humo y polvo situada en la atmósfera media o alta alteraría el balance energético del sistema Tierra-atmósfera (*derecha*). La mayor parte de la radiación solar quedaría entonces absorbida en la nube; y una buena fracción de la misma se reemitiría directamente hacia el espacio en forma de radiación infrarroja, sin siquiera alcanzar la superficie. En esas condiciones perturbadas, el balance neto de calor en el suelo sería la diferencia entre una irradiancia infrarroja hacia abajo de 65 unidades y una irradiancia hacia arriba de 70 unidades; las dos irradiancias se compensarían, anulando cualquier efecto de calentamiento por parte de la atmósfera. La superficie y la baja atmósfera se enfriarían al disiparse el calor residual.

Si la Tierra fuese un cuerpo sin atmósfera, como la Luna, su superficie emitiría la radiación solar absorbida directamente al espacio. En este caso, la temperatura de la Tierra, promediada globalmente, sería bastante inferior al punto de fusión del hielo, y la vida, tal como la conocemos, no podría existir en nuestro planeta. Para nuestra fortuna, la Tierra tiene una atmósfera que absorbe y aprisiona parte del calor emitido por la superficie, elevando con ello la temperatura media a nivel del suelo hasta un valor muy por encima del punto de fusión del hielo y proporcionando un entorno favorable para formas de vida que se sirven del agua líquida, como la nuestra.

¿Por qué se habla del aislamiento térmico de la superficie terrestre debido a la atmósfera (el "efecto de invernadero")? Porque la radiación solar atraviesa la atmósfera más fácilmente de lo que lo hace la radiación térmica. La radiación emitida por el Sol se encuentra principalmente en la parte visible del espectro electromagnético, mientras que la radiación térmica emitida por la superficie terrestre se concentra en la parte infrarroja. Los principales componentes absorbentes de infrarrojo de la atmósfera son el agua (en las formas de cristales de hielo, gotículas líquidas y vapor) y el dióxido de carbono, ambos esencialmente transparentes a la luz visible. De ahí que la atmósfera, en general, actúe como una ventana para la radiación solar y como una manta para la radiación infrarroja.

En condiciones normales, la temperatura de la troposfera, o baja atmósfera, decrece gradualmente al crecer la altura hasta aproximadamente 12 kilómetros, límite llamado tropopausa. El calor de la superficie terrestre se transporta hacia arriba atravesando la atmósfera mediante diversos mecanismos: la radiación térmica, la turbulencia a pequeña escala, la convección a gran escala y la liberación de calor latente mediante la condensación de vapor de agua ascendente. En una atmósfera puramente radiactiva (es decir, donde el aire no se mueva verticalmente y en la que toda la energía se transmita por radiación) las capas inferiores del aire, donde se absorbe la mayor parte de la energía solar, estarían más calientes que las capas altas; en esta situación, la radiación térmica dirigida hacia arriba sería superior a la radiación térmica dirigida hacia abajo, permitiendo que el exceso de calor escapase al espacio. Si la opacidad de la atmósfera a la radiación infrarroja aumentase (sin variar la opacidad a la luz visible), la temperatura aumentaría.



3. TRANSMISION DE LA RADIACION SOLAR a través de nubes de polvo y de humo representada en este gráfico en función del espesor óptico de cada nube, una medida de la opacidad equivalente al logaritmo neperiano, cambiado de signo, de la atenuación de un haz de luz incidente. Para un espesor óptico dado, una nube de humo absorbe, evidentemente, mucha más radiación solar que una nube de polvo. Por comparación, se dan tres niveles típicos de luz transmitida: corresponden a un día cubierto de nubes (*a*), un nivel de luz en el que la fotosíntesis es apenas posible (*b*) y una noche clara de luna llena (*c*).

Por ejemplo, si se añadiese a la atmósfera dióxido de carbono (un buen absorbente infrarrojo) en cantidades suficientes, se calentaría la superficie.

Inversamente, si algún componente de la atmósfera redujera la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie sin aumentar apreciablemente la opacidad al infrarrojo, la temperatura en el suelo descendería. Por ejemplo, si toda la radiación solar se absorbiera en la alta atmósfera y no llegase al suelo, y si la superficie pudiese radiar energía al espacio sin impedimento, la temperatura de la superficie descendería hasta la que corresponde a un planeta carente de atmósfera. Si la absorción de energía solar se diera por encima de la mayor parte de la atmósfera, el balance de radiación de la Tierra se equilibraría sin necesidad de efecto de invernadero (lo que nos faculta para llamar a esta condición "efecto de antiinvernadero"). Bajo la capa de aire donde se absorbiera la energía solar, la temperatura de la atmósfera no variaría con la altura: en cada nivel inferior, el flujo de radiación infrarroja hacia arriba igualaría el descendente, y el intercambio de energía sería despreciable.

Las partículas de la atmósfera pueden afectar el balance de radiación de la Tierra de varias maneras: absorbiendo radiación solar, reflejándola hacia el espacio y absorbiendo o emitiendo radiación infrarroja. En general, una nube de finas partículas (un aerosol) tiende a calentar la capa atmosférica que ocupa, pero calentará o enfriará las capas subyacentes y la propia superficie según las partículas absorban radiación infrarroja más fácilmente de lo que reflejan o absorban luz visible.

El efecto antiinvernadero de un aerosol se hace máximo para partículas altamente absorbentes en longitudes de onda visibles. Así, llega mucha menos radiación solar a la superficie si un aerosol está compuesto por partículas oscuras, como el hollín, que absorben fuertemente la luz visible, que si se trata de un aerosol constituido por partículas brillantes, como las del polvo del suelo, que principalmente difunden la luz. Para evaluar, pues, los posibles efectos climáticos de una guerra nuclear debe prestarse particular atención a las partículas de hollín originadas por los incendios, ya que el hollín es una de las pocas materias corrientes que, en forma de partículas, absorbe la luz visible mucho más intensamente que la radiación infrarroja.

La cuantía con la que el aerosol enfriará la superficie (impidiendo el paso de la radiación solar) o la calentará (reforzando el efecto de invernadero) depende del tamaño de las partículas. Si el diámetro de las partículas es menor

que la longitud de onda típica de la radiación infrarroja (unos 10 micrometros), la opacidad del aerosol en el infrarrojo será menor que su opacidad en el visible. Consecuentemente, un aerosol de partículas muy finas que absorba, siquiera de una forma débil, la radiación solar, producirá un efecto en el visible mayor que su efecto en el infrarrojo, dando lugar a un apreciable enfriamiento de las capas atmosféricas más bajas y de la propia superficie. En el caso del hollín, ello es cierto incluso para partículas algo mayores.

Los efectos sobre la radiación visible e infrarroja asociados a capas de partículas tienen también que ver con el espesor y densidad del aerosol. La intensidad de la radiación solar que alcanza el suelo decrece exponencialmente con la cantidad de materia en forma de partículas finas y absorbentes de la atmósfera. Por otra parte, la cantidad de radiación infrarroja que llega al suelo depende más de la temperatura del aire que de la cantidad de aerosol. De ahí que, cuando existe una gran cantidad de aerosol, la consecuencia climática dominante tiende a ser un intenso enfriamiento en superficie.

El "espesor óptico" de un aerosol (una medida de la opacidad igual al logaritmo neperiano, cambiado de signo, de la atenuación de un haz de luz incidente por absorción y difusión) sirve de indicador conveniente de los efectos climáticos potenciales del aerosol. Así, una nube con un espesor óptico muy inferior a la unidad sólo causará perturbaciones menores, ya que la mayor parte de la luz alcanzará la superficie; por contra, una nube con un espesor óptico de la unidad o mayor generará una perturbación importante, puesto que la mayor parte de la luz quedará absorbida en la atmósfera o se difundirá hacia el espacio. Aun cuando las partículas volcánicas tienen un tamaño óptimo para realzar los efectos visibles sobre los efectos infrarrojos, la magnitud del enfriamiento superficial inducido queda limitada por el moderado espesor óptico de los aerosoles volcánicos (inferior al 0,3) y por la muy débil absorción intrínseca a longitudes de onda del visible. Sin embargo, las nubes volcánicas mayores pueden perturbar el balance radiativo de la Tierra lo suficiente para producir un tiempo anómalo. Las enormes nubes de polvo que arrojaría a la atmósfera el impacto de un asteroide o un cometa con un diámetro de varios kilómetros o más podrían producir efectos climáticos mucho más importantes. Esas nubes de polvo podrían tener un espesor óptico muy grande, tal vez cercano a mil en el comienzo.

Los efectos radiativos de un aerosol sobre la temperatura de un planeta dependen no solamente del espesor óptico del aerosol, su absorción en el visible y el tamaño medio de sus partículas, sino también de la variación de esas propiedades con el tiempo. Cuanto más tiempo se mantenga un espesor óptico importante, tanto más cerca se moverán la temperatura en superficie y la de la atmósfera hacia un nuevo estado de equilibrio. Normalmente, la superficie del océano tarda varios años en responder a variaciones del balance global de radiación, dada la gran capacidad calorífica de la capa más alta y mezclada del mar, que se extiende hasta una profundidad de unos 100 metros. Por el contrario, la temperatura del aire y la temperatura de las masas de tierra continentales alcanzan nuevos valores de equilibrio en sólo unos pocos meses. De hecho, cuando la atmósfera se enfría fuertemente, la convección por encima de la superficie cesa y la temperatura del suelo decrece rápidamente por enfriamiento radiativo, alcanzando el equilibrio en pocos días o semanas. Ello sucede de manera natural cada noche, aunque en un período tan corto no se alcanza el equilibrio.

Las partículas se ven eliminadas de la atmósfera por varios procesos: deposición bajo la influencia de la gravedad, adherencia al suelo y a otras superficies y lavado por nubes de agua, por la lluvia y por la nieve. El tiempo de vida de las partículas frente a la eliminación "húmeda" depende de la frecuencia de formación de nubes y la precipitación a varias altitudes. En los primeros kilómetros de altura, en la atmósfera normal, las partículas pueden eliminarse por lavado en cuestión de días. En la alta troposfera (por encima de cinco kilómetros) el tiempo medio de vida de las partículas aumenta hasta varias semanas o más. Todavía más arriba, en la estratosfera (por encima de 12 kilómetros), raramente se forman nubes de agua, de modo que la vida media de partículas pequeñas se cifra en un año o más. La eliminación estratosférica tiene lugar principalmente por precipitación gravitatoria y por transporte convectivo a gran escala de las partículas. La deposición de partículas sobre

	CASO	POTENCIA TOTAL (MEGATONES)	EXPLOSIONES SUPERFICIALES (% DE LA POTENCIA TOTAL)	BLANCOS URBANOS O INDUSTRIALES (% DE LA POTENCIA TOTAL)	POTENCIA DE LAS CABEZAS NUCLEARES (MEGATO.)	NUMERO TOTAL DE EXPLOSIONES	MASA DE HUMO SUBMICROMETRICO (MILLONES DE TONELADAS)	MASA DE POLVO SUBMICROMETRICO (MILLONES DE TONELADAS)	ESPESOR OPTICO DEL HUMO	ESPESOR OPTICO DEL POLVO
A	INTERCAMBIO BASICO	5,000	57	20	.1–10	10,400	225	65	4.5	1
B	EXPLOS. AEREAS BAJA POTENCIA	5,000	10	33	.1–1	22,500	300	15	6	.2
C	ATAQUE A GRAN ESCALA	10,000	63	15	.1–10	16,160	300	130	6	2
D	ATAQUE A ESCALA INTERMEDIA	3,000	50	25	.3–5	5,433	175	40	3.5	.6
E	ATAQUE LIMITADO	1,000	50	25	.2–1	2,250	50	10	1	.1
F	ATAQUE GENERAL CONTRAFUERZAS	3,000	70	0	1–10	2,150	0	55	0	.8
G	ATAQUE CONTRA BLANCOS PROTEGIDOS	5,000	100	0	5–10	700	0	650	0	10
H	ATAQUE URBANO	100	0	100	.1	1,000	150	0	3	0
I	GUERRA FUTURA	25,000	72	10	.1–10	28,300	400	325	8	5

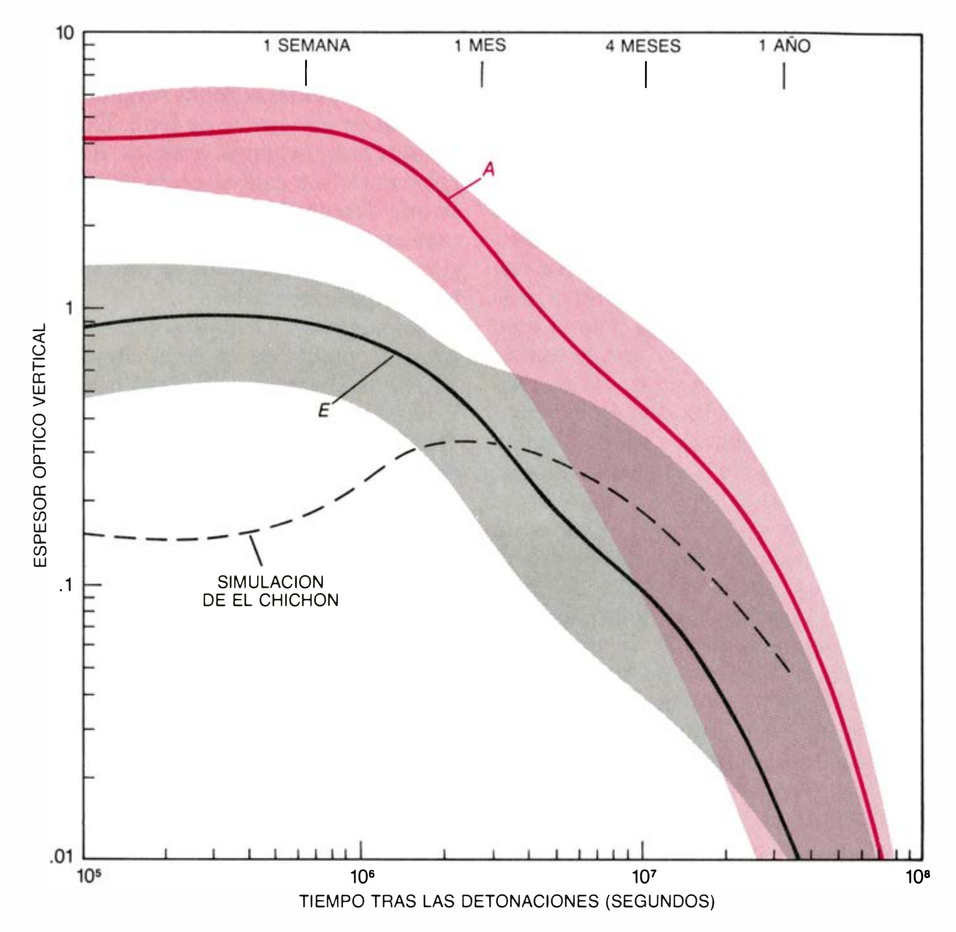
4. VARIOS CASOS DE GUERRA NUCLEAR esquematizados, extraídos de una relación de posibilidades mucho mayor estudiada por los autores. Las últimas cuatro columnas de la derecha dan el resultado de cada caso en términos de las nubes de humo y polvo producidas por las detonaciones e incendios. Todos los casos que aquí se muestran, excepto el último, caen dentro de las actuales posibilidades de los Estados Unidos y de la Unión Soviética.

superficies es muy poco eficaz para partículas de humo y polvo de tamaño medio; requiere varios meses para una reducción importante en su concentración.

La altura hasta donde se inyectan las partículas se relaciona con su tiempo de residencia. En general, cuanto mayor sea la altura inicial, tanto más se prolonga el tiempo de residencia en la atmósfera normal. Sin embargo, unas inyecciones de hollín y polvo enormes pueden alterar profundamente la estructura de la atmósfera y la velocidad de eliminación de las partículas.

En nuestro análisis de los efectos climáticos de una guerra nuclear hemos adoptado buen número de casos específicos, basados en lo que se conoce acerca de los efectos de distintas explosiones atómicas, el tamaño y distribución de los actuales arsenales nucleares y los planes de los Estados Unidos y de la Unión Soviética en caso de guerra. Entre las varias docenas de casos que hemos analizado se cuentan un ataque "contra valores", de 100 megatones, dirigido estrictamente hacia ciudades, un ataque de 3000 megatones "contra fuerzas", dirigido estrictamente hacia silos de misiles, y un ataque de 10.000 megatones, o "guerra en gran escala", dirigido contra un panel de blancos en ambos lados. Nuestro "caso base", de comparación, es un disparo mutuo de 5000 megatones, en el que un 20 por ciento de la potencia explosiva total afectaría a zonas urbanas, suburbanas e industriales. Todos los casos de ataque postulados caben perfectamente en las actuales posibilidades de ambas superpotencias.

La explosión nuclear provoca incendios, tanto en un entorno urbano como en uno rural. El relámpago de radiación térmica de la explosión nuclear, que tiene un espectro similar al de la radiación solar, da cuenta, aproximadamente, de un tercio de la totalidad de la energía liberada en la explosión. La propia intensidad del relámpago desencadena el incendio espontáneo de múltiples materiales combustibles a distancias de 10 o más kilómetros de una explosión aérea de un megatón detonada a una altura nominal de un kilómetro. La onda expansiva de la explosión extinguiría muchos de los incendios iniciales, pero también iniciaría numerosos incendios secundarios, desviando llamas, destrozando conducciones de gas y depósitos de combustibles y produciendo chispas eléctricas y mecánicas. La destrucción resultante de la onda expansiva dificultaría también la efectividad de la lucha contra los incendios y ayudaría así a la propagación de primarios y secundarios. Basándose en los efectos incendiarios conocidos de las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki, en 1945, puede estimarse que los incendios que probablemente causaría una sola de las armas estatégicas nucleares, mucho más potentes, disponibles hoy día se extendería sobre un área de entre decenas y centenares de kilómetros cuadrados.



5. VARIACION DE LA OPACIDAD EN EL TIEMPO para las nubes de polvo y humo resultantes de cierto número de casos de guerra nuclear, representada aquí en términos del espesor óptico vertical de las nubes promediado para el hemisferio Norte. Los espesores ópticos se calcularon para la luz visible a una longitud de onda de 550 nanómetros. Los resultados tienden a caer en dos bandas. La banda superior incluye aquellos casos que dieron resultados próximos al arquetipo de 5000 megatones de los autores, indicado por la curva de trazo continuo en color; la potencia total explosiva de los casos de esa banda se extiende de 100 a 10.000 megatones. La banda inferior incluye los casos que dieron resultados menos espectaculares; los casos de esta banda se extienden desde el intercambio limitado de 1000 megatones indicado por la curva negra hasta un ataque contrafuerzas de 3000 megatones, dirigido a objetivos militares solamente. Son de esperar desajustes climáticos importantes siempre que el espesor óptico medio sobre un hemisferio supere, aproximadamente, la unidad. El espesor óptico medio sobre el hemisferio Norte de la nube de polvo levantada por la erupción del volcán El Chichón, en 1982, sirve de referencia.

Las explosiones nucleares detonadas sobre bosques y praderas prenderían también grandes incendios, pero la situación en ese caso es más difícil de evaluar. Entre los factores que influyen en los incendios a campo abierto se cuentan la humedad, el contenido de vapor de agua del combustible, la cantidad de éste y la velocidad del viento. Aproximadamente una tercera parte de la superficie de las tierras de la zona templada septentrional está cubierta de bosques; una superficie igual está cubierta de monte bajo y pradera. Se sabe de violentos incendios forestales que, desde unos pocos focos, se han propagado a lo largo de decenas de millares de kilómetros cuadrados; en ausencia de guerra nuclear, tales incendios suelen darse una vez por década. Aunque la mayoría de los incendios generados por explosiones nucleares en campo abierto se confinarían probablemente al área inmediata expuesta al intenso relámpago térmico, quizás otros mucho mayores se iniciasen por efecto de explosiones múltiples sobre objetivos militares dispersos, por ejemplo, silos de misiles.

La cantidad total de humo que probablemente genere una guerra nuclear depende, entre otras cosas, de la cantidad total de armas que se detonen sobre cada tipo de blanco, la eficacia de las explosiones en provocar incendios, el área media incendiada por megatón

explotado, la cantidad media de material combustible de la región irradiada, la fracción de material combustible consumida por los fuegos, la cantidad de humo producida por cada unidad de combustible quemado y la fracción de humo que, con el tiempo, se incorpora a la circulación atmosférica global después de que la lluvia local se quede con su parte. Asignando los valores más probables a esas variables para el caso de una guerra nuclear en que se usaran menos del 40 por ciento de los arsenales estratégicos de las dos superpotencias, calculamos que la emisión total de humo subsiguiente a un ataque nuclear con su represalia correspondiente excedería, fácilmente, los cien millones de toneladas métricas. En muchos aspectos, es una estimación moderada. Crutzen y sus colaboradores Ian Galbally, de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) en Australia, y Christoph Brühl, del Instituto Max Planck de Maguncia, acaban de concluir que la emisión total de humos debida a una guerra nuclear a gran escala rondaría los 300 millones de toneladas.

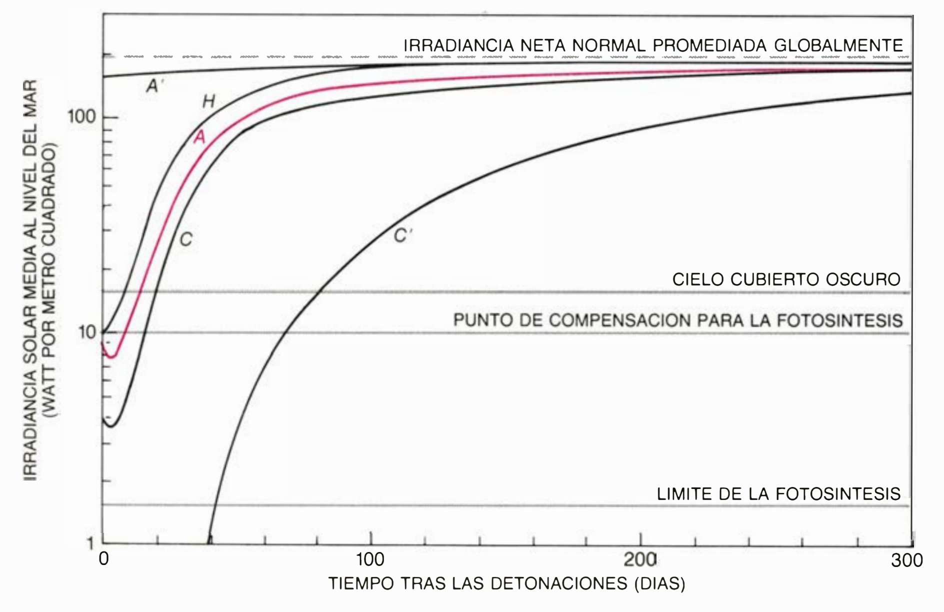
Cien millones de toneladas de humo, distribuidas de manera uniforme sobre la totalidad del globo, podrían reducir la intensidad de la radiación solar que llega al suelo hasta en un 95 por ciento. Las nubes iniciales, sin embargo, no cubrirían la tierra entera; grandes regiones del hemisferio Norte, particularmente en las zonas de los blancos, estarían aún más oscuras; a mediodía, el nivel de luz en esas zonas sería comparable al de una noche de luna. De persistir durante semanas o meses, una oscuridad de ese calibre en horas de luz podría desencadenar una catástrofe climática. De hecho, cantidades muy inferiores de humo podrían ya causar perturbaciones apreciables.

Los incendios a campo abierto suelen inyectar humo en la baja atmósfera hasta una altura de unos cinco o seis kilómetros. En contraste, se sabe que grandes incendios urbanos han inyectado humo en la troposfera superior, a alturas de hasta 12 kilómetros, probablemente. La escala sin precedentes de los incendios que desencadenarían las grandes explosiones nucleares y la compleja actividad convectiva generada por explosiones múltiples quizás impulsasen humo todavía más arriba. Estudios de la dinámica de macroincendios sugieren que los penachos de humo podrían alcanzar hasta 20 kilómetros de altura, dentro de la estratosfera.

Durante el bombardeo de Hamburgo, en la segunda guerra mundial, el centro de la ciudad quedó destruido por una intensa tempestad de fuego; vientos de fuerza huracanada, generados por el calor, barrieron la ciudad, a ras del suelo, hacia el centro desde todas direcciones. El súbito desprendimiento de calor en una zona grande puede crear vórtices de fuego, tornados de calor y ciclones con columnas convectivas muy altas. La propia intensidad de tales incendios tendería a reducir considerablemente la emisión de humos mediante dos procesos: la oxidación de partículas carbonadas del humo a las extremadamente altas temperaturas originadas por el propio incendio y el lavado de partículas de humo por la precipitación formada en la columna convectiva. Ambos efectos se tomaron en cuenta en núestras estimaciones de la emisión total de humo en una guerra nuclear.

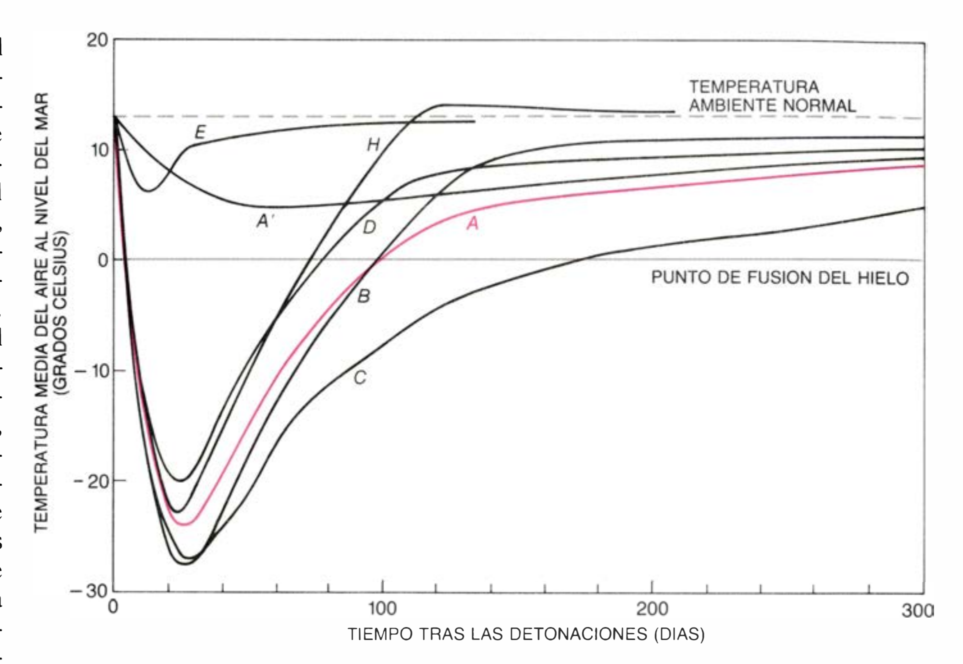
El impacto climático del humo depende de sus propiedades ópticas, que a su vez son función del tamaño, forma y composición de las partículas. El humo que mejor tamiza la luz es el constituido por partículas de un radio aproximado de 0,1 micrometros y composición rica en grafito y semejante al hollín. El humo menos eficaz para atenuar la radiación solar está formado por partículas de tamaño superior a 0,5 micrometros, con composición predominantemente aceitosa. El humo de un incendio forestal lo integran partículas aceitosas extremadamente finas, mientras que el humo de un incendio urbano se nutre de agregaciones mayores de partículas de hollín. El humo de incedios devoradores suele contener grandes partículas de ceniza, alquitrán, polvo y otros residuos, todo ello barrido por los vientos generados por el calor. Las mayores de esas partículas caen de la nube de humo a poca distancia, viento abajo, del incendio. Aunque los incendios muy intensos producen menos humo, levantan más polvo fino y queman metales como el aluminio y el cromo, que generan finos aerosoles.

El desprendimiento de compuestos tóxicos en incendios urbanos no ha recibido todavía la atención necesaria. Es bien conocido que muchas víctimas de incendios accidentales murieron por envenenamiento con gases tóxicos. Además del monóxido de carbono, que se produce copiosamente en muchos incendios, el cianuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno se originan al quemarse materiales sintéticos de los modernos edificios y mobiliarios. Si en un conflicto nuclear se desprenden y queman grandes cantidades de compuestos orgánicos, se crearían otras toxinas, que pasarían al aire. La posibilidad de que se contaminaran grandes zonas con tales pirotoxinas, adsorbidas a las superficies de las partículas de humo, cenizas y polvo y arrastradas a grandes distancias por los vientos, precisa investigación ulterior.



6. VARIACION DE LA CANTIDAD DE RADIACION SOLAR que alcanza el suelo a través de una nube extensa de humo y polvo creada por una guerra nuclear en varios de los casos considerados por los autores. Cada curva señala la irradiancia media del suelo en el hemisferio Norte para un caso dado. Las irradiancias corresponden a nubes de humo promediadas horizontalmente y no tienen en cuenta la posibilidad de que la cobertura sea parcial. La curva en color corresponde al caso básico de 5000 megatones (*curva A*). La curva *A'* es una variante del caso básico que recoge sólo los efectos del polvo. La *C'* es una variante de intercambio a gran escala de 10.000 megatones que asigna valores más extremos a las variables de emisión de humos. Se indica también el nivel energético para el cual la fotosíntesis no puede mantenerse al compás de la respiración de una planta típica (nivel que se conoce como punto de compensación) y el nivel energético en que cesa la fotosíntesis. Esos dos niveles varían bastante entre plantas.

Las explosiones nucleares a ras del suelo, o en su vecindad, levantan ingentes cantidades de polvo. Los principales mecanismos generadores de polvo comprenden la expulsión y disgregación de partículas del suelo del propio cráter formado por la explosión, la vaporización y subsiguiente condensación de suelo y roca, y el levantamiento de polvo y humo superficial. Una explosión de un megatón sobre el suelo puede excavar un cráter de cientos de metros de diámetro, eyectar varios millones de toneladas de materia, elevar entre 100.000 y 600.000 toneladas de suelo hasta gran altitud e inyectar entre 10.000 y 30.000 toneladas de partículas de polvo submicrométricas en la estratosfera. La altura a la que se inyecta el polvo depende de la potencia de la explosión: las nubes de polvo producidas por explosiones con una potencia inferior a 100 kilotones no penetrarán generalmente en la estratosfera, mientras que las provinientes de explosiones con una potencia superior al megatón se estabilizarán principalmente en la estratosfera. Las explosiones por encima del suelo pueden elevar también grandes cantidades de polvo, aspirado desde la superficie por la bola de fuego ascendente. El efecto combinado de explosiones múltiples podría incrementar la cantidad total de polvo elevado a grandes altitudes.



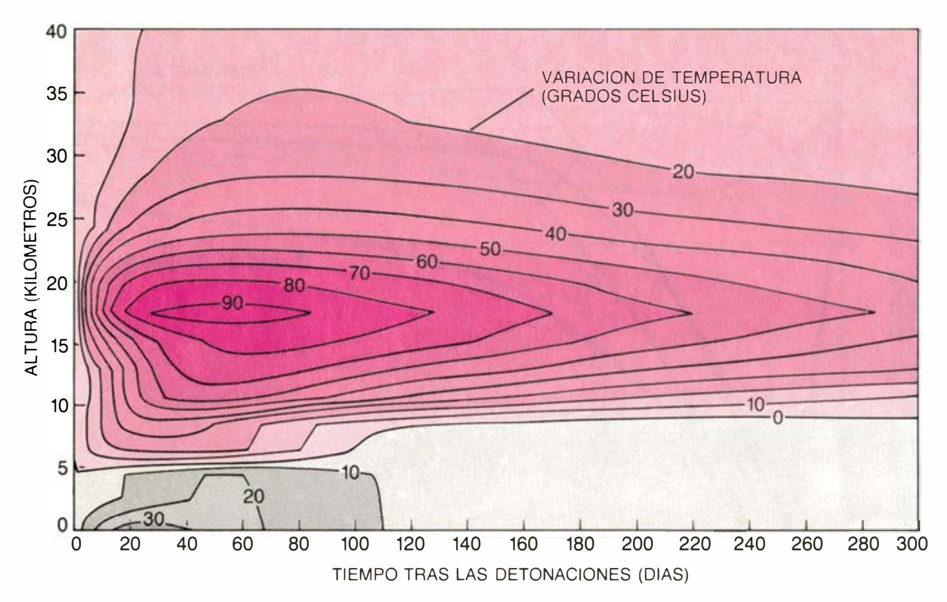
7. VARIACIONES DE TEMPERATURA a ras de suelo en el hemisferio Norte, representadas en función del tiempo para diversos casos. De nuevo, la curva en color corresponde al caso básico de 5000 megatones empleado por los autores. En general, el humo de la troposfera (por debajo de 12 kilómetros) tendría un efecto sustancial de enfriamiento a corto plazo, mientras que el polvo de la estratosfera (por encima de 12 kilómetros) provocaría una tendencia al enfriamiento, menos intensa pero más duradera. La disminución media de temperatura calculada en cada caso es probablemente la mayor que podría registrarse, y ello sólo en las regiones interiores de los continentes. La temperatura sobre el océano bajaría sólo unos pocos grados Celsius, o quizá menos. La mezcla de las masas de aire continentales y marítimas podría dar, por tanto, un descenso menor de temperatura sobre el suelo, particularmente en las regiones costeras. El mismo fenómeno, sin embargo, conduciría también a prolongadas y fuertes tormentas costeras. Los cambios de temperatura representados en esta gráfica se han promediado para las diversas estaciones. Si la guerra tuviera lugar en verano, el descenso de temperatura sería mayor que el indicado en cada caso, y lo contrario sucedería si la guerra se produjese en invierno. Una disminución de temperatura de sólo unos pocos grados puede dañar gravemente la agricultura. En un número de casos muy grande se registran descensos hasta los 20 grados Celsius bajo cero o más, y la temperatura tarda meses en volver a cero.

La cantidad de polvo producido en una guerra nuclear dependería de manera crítica de la forma en que se usasen las armas. Las explosiones en el suelo estarían dirigidas a blancos protegidos, verbigracia, silos de misiles y puestos de mando subterráneos. Los blancos débilmente protegidos se atacarían tanto por explosiones en el aire como por explosiones en superficie. Hay más de 1000 silos de misiles sólo en los Estados Unidos continentales, a cada uno de los cuales probablemente apuntan dos cabezas nucleares soviéticas, por lo menos. Alrededor de 1400 silos de misiles rusos están análogamente vigilados por cabezas nucleares estadounidenses. Las bases aéreas y aeródromos secundarios, bases de submarinos y puestos de mando y control se cuentan entre los muchos otros blancos estratégicos a los que se podrían asignar explosiones superficiales. En resumen, parece verosímil que se detonaran al menos 4000 megatones de armas de alta potencia, en o cerca del suelo, incluso en una guerra nuclear en la que no se atacasen las ciudades: se inyectarían aproximadamente 120 millones de toneladas de partículas submicrométricas de polvo en la estratosfera de la zona templada septentrional. Se trata de una inyección muchas veces mayor que todo el polvo submicrométrico elevado hasta la estratosfera por la erupción del volcán El Chichón (México), en 1982, y es comparable a las inyecciones globales de polvo submicrométrico de erupciones volcánicas muy superiores, como la del Tambora, en 1815, y la del Krakatoa, en 1883.

Frecuentemente se establecen, por conveniencia, analogías entre los efectos atmosféricos de las erupciones volcánicas importantes y los de una guerra nuclear. Sin embargo, no hay manera sencilla de comparar los efectos de una erupción volcánica con los de una serie de detonaciones nucleares. Las partículas de aerosol producidas por los volcanes son fundamentalmente diferentes en composición, tamaño y forma de las producidas en explosiones nucleares. Por tanto, hemos basado nuestros cálculos en las propiedades del polvo medidas directamente en nubes debidas a explosiones nucleares.

La única comparación adecuada entre la erupción volcánica y la explosión nuclear es el espesor óptico del aerosol persistente que se produce. De hecho, hemos utilizado datos sobre "velos de polvo" globales generados por erupciones volcánicas para someter a prueba y calibrar nuestros modelos climáticos. El hacerlo así nos ha permitido explicar cuantitativamente el efecto de enfriamiento superficial hemisférico observado tras las principales erupciones volcánicas. Los presentes cálculos referentes al polvo nuclear concuerdan enteramente con las observaciones de fenómenos volcánicos. Por ejemplo, está ahora claro que las erupciones volcánicas violentas generan un apreciable enfriamiento climático durante un año o más. Aún así, en la historia escrita, los volcanes han desempeñado un papel climático bastante modesto. Que los volcanes sean fuentes localizadas de polvo limita su influencia geográfica; además, inyectan comparativamente poco polvo fino (y nada de hollín) en la estratosfera. Las explosiones nucleares, por el contrario, son un poderoso y eficaz medio de inyectar grandes cantidades de fino hollín y polvo en la atmósfera sobre grandes regiones.

Los átomos producidos en las reacciones de fisión de las explosiones atómicas suelen presentarse en forma de isótopos inestables. La desintegración radiactiva de esos isótopos libera radia-



8. VARIACION DE LA TEMPERATURA CON LA ALTURA sobre los continentes septentrionales durante el primer año subsiguiente al caso básico de guerra nuclear de 5000 megatones. Los contornos dan la variación media de temperatura a intervalos de 10 grados Celsius, basada en el modelo unidimensional convectivo-radiativo de los autores. La zona gris indica porciones de la atmósfera enfriadas por debajo de su temperatura normal; la zona de color, las calentadas por encima de su temperatura normal. El intenso calentamiento de la alta troposfera y baja estratosfera se atribuye a la absorción de radiación solar.

ciones alfa, beta y gamma. En la mayoría de armas nucleares, al menos la mitad de la energía liberada se genera por fisión y el resto por fusión. Se producen alrededor de 300 isótopos radiactivos diferentes. La mayoría se condensa sobre los aerosoles y polvo formados en la bola de fuego o aspirados por ella. En consecuencia, el polvo y la radiactividad generados por una explosión nuclear están íntimamente relacionados.

De interés particular aquí son la sedimentación radiactiva inmediata e intermedia. La primera está asociada a isótopos radiactivos de vida corta que se condensan sobre partículas grandes de tierra, que a su vez caen al suelo al cabo de unas horas de producida la explosión nuclear. La sedimentación intermedia está asociada a isótopos de vida más larga, transportados por partículas menores que arrastra el viento y se eliminan por sedimentación y precipitación en un intervalo de días a meses. La sedimentación inmediata se produce en explosiones en el suelo, mientras la intermedia se da en explosiones en el suelo y en el aire en un dominio de potencia de 10 a 500 kilotones, las cuales depositan su radiactividad en la troposfera media y alta.

El peligro de la sedimentación radiactiva se mide en términos de la dosis total en rad (unidad de exposición a la radiación equivalente a 100 erg de energía ionizante depositados en un gramo de tejido), la variación de la dosis en rad por hora y el tipo de radiación. Los efectos más perniciosos son los producidos por la intensa y penetrante radiación gamma de la deposición inmediata. La sedimentación intermedia, más extendida, da lugar a una dosis de rayos gamma a largo plazo y menos potente. Una exposición de 450 rad a los rayos gamma en todo el cuerpo, recibida a lo largo de varios días, es letal para la mitad de los adultos sanos expuestos. Dosis crónicas de 100 rad o más debidas a sedimentación intermedia podrían inhibir el sistema inmunológico incluso en personas sanas, y causarían incrementos a largo plazo en la incidencia de diversos tipos de cáncer, defectos genéticos y otras enfermedades.

Nuestros estudios más recientes de los efectos de la sedimentación radiactiva indican, en el caso básico, que la sedimentación inmediata podría contaminar millones de kilómetros cuadrados de tierra con radiactividad letal. La sedimentación intermedia cubriría al menos la zona templada septentrional, produciendo, a largo plazo, exposiciones medias de rayos gamma en todo el cuerpo de unos 50 rad en poblaciones no protegidas. Las exposiciones internas de ciertos órganos a isótopos radiactivos biológicamente activos, como el estroncio 90 y el yodo 131, que penetran en la cadena de alimentación, duplicarían o triplicarían esas dosis. Según Joseph B. Knoz, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, si se atacara directamente las centrales nucleares, la dosis media de rayos gamma a largo plazo aumentaría hasta varios cientos de rad o más.

Los modelos de ordenador que hemos empleado para establecer la magnitud potencial de las secuelas globales a largo plazo de una guerra nuclear son unidimensionales: consideran sólo la estructura vertical de la atmósfera. Pero ésta es un complicado sistema tridimensional cuyas intrincadas interacciones determinan su respuesta a las perturbaciones. En el momento actual, sin embargo, no hay modelos tridimensionales con las características apropiadas para tratar el problema del invierno nuclear con alta precisión, aunque se elaboran ya varios. Los modelos existentes para el clima y la circulación general de la atmósfera incorporan cierto número de tratamientos empíricos para procesos físicos que no se conocen bien. En la hipótesis de un universo nuclear, el clima queda tan seriamente alterado que es dudosa la aplicabilidad de tales tratamientos.

Nuestro enfoque, por tanto, ha sido estimar los efectos de primer orden mediante cálculos microfísicos, químicos y ópticos detallados en un formato unidimensional. Ni tan sólo este enfoque simplificado se había intentado antes de nuestro trabajo, y no estaba claro que un trabajo tridimensional más elaborado estuviera justificado. Basándose en los efectos unidimensionales de primer orden predichos, se dedujeron las principales interacciones meteorológicas tridimensionales que habrían de tratarse en estudios más refinados. Los resultados tridimensionales vienen a confirmar nuestros resultados unidimensionales.

En nuestro estudio se usaron tres modelos básicos: un modelo de guerra nuclear, un modelo de microfísica de partículas y un modelo radiativo-convectivo del clima. El modelo de guerra nuclear determina las cantidades de humo, polvo, radiactividad y pirotoxinas generadas por un ataque atómico específico, basándose (entre otras cosas) en las estimaciones de humo y polvo citadas arriba. El modelo microfísico simula la evolución de la cantidad y el tamaño de las partículas de polvo y humo, así como la sedimentación de radiactividad, teniendo en cuenta las interacciones físicas y el transporte vertical de partículas a todas las altitudes. El modelo radiativo-convectivo calcula las propiedades ópticas e infrarrojas de las partículas en transformación, los flujos de energías en el visible e infrarojo y las temperaturas del aire en función de las respectivas altitudes y del tiempo. Dado que las temperaturas del

aire predichas dependen de las capacidades caloricas de la superficie, se hicieron cálculos separados para fenómenos sobre mar y sobre tierra, a fin de tener en cuenta las posibles diferencias de temperatura.

Los modelos unidimensionales no pueden predecir con precisión los efectos locales o a corto plazo de una guerra nuclear. La aplicabilidad de las predicciones basadas en tales modelos depende de la velocidad y extensión de la dispersión de los penachos de humo y de las nubes de polvo. Poco después de un ataque atómico, miles de penachos y nubes de polvo se distribuirían en toda la zona templada septentrional, a alturas de hasta 20 kilómetros. La acción de la difusión turbulenta horizontal, la cizalladura vertical del viento y continuadas emisiones de humo repartirían casi con certeza las nubes de detritos nucleares sobre la totalidad de la zona y llenarían los huecos en el plazo de una semana. Los efectos locales en ese período podrían discrepar considerablemente respecto al promedio simulado con nuestros modelos unidimensionales.

Las grandes incertidumbres inherentes en cualquier valoración de los efectos de una guerra nuclear aconsejaron el desarrollo de una gama de simulaciones para investigar la sensibilidad de los diversos resultados a variaciones en la hipótesis y en las variables físicas clave. Aunque no todos esos resultados se pueden discutir en un artículo de la presente extensión, se hallan reunidos algunos descubrimientos seleccionados en las ilustraciones que le acompañan.

En general, nuestros resultados sugieren que el espesor óptico de la nube de humo y polvo resultante de un ataque nuclear masivo sería, como mínimo, comparable o mayor que el resultante de una erupción volcánica importante, y que el espesor óptico más probable sería un orden de magnitud mayor. El resultado más probable de una guerra nuclear sería, por tanto, una catástrofe climática.

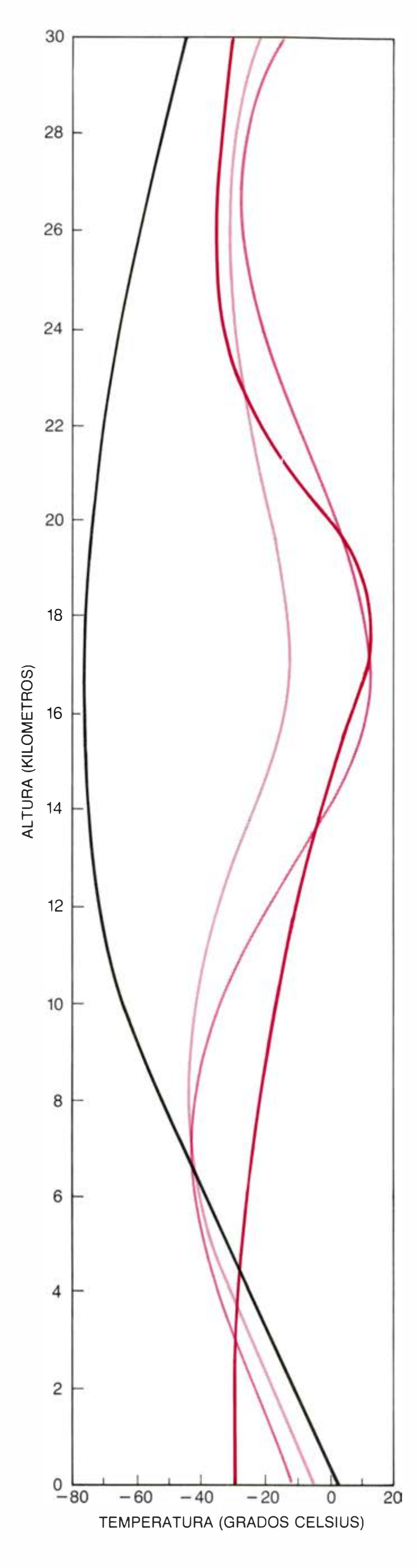
El efecto final del humo y del polvo sobre el clima depende de la fracción de radiación solar que no alcanza la superficie. Puede llegar a darse, por tanto, un efecto de saturación. Por ejemplo, una nube de humo con un espesor óptico de tres puede impedir que el 95 por ciento o más de la radiación solar alcance el suelo. Espesores ópticos mayores pueden producir solamente pequeños decrecimientos adicionales en la radiación solar en superficie. Así, un espesor óptico aproximado de tres viene a ser el nivel de saturación para efectos climáticos inducidos por el humo. El nivel de saturación para el polvo se da a espesores ópticos en torno a 20; su introducción es mucho más gradual, con espesor óptico creciente, que el nivel de saturación para el humo. No se sabe si una guerra nuclear podría levantar suficiente polvo para crear saturación óptica a escala global.

El mecanismo por el que una nube de humo atenúa la luz difiere también de cómo lo hace una de polvo. Un velo de humo ahollinado absorbe la mayor parte de la luz incidente y difunde sólo una pequeña fracción, devolviéndola al espacio o dirigiéndola hacia la superficie. La absorción calienta rápidamente las nubes de humo, induciendo poderosos movimientos de aire y vientos. Las nubes de polvo, por otra parte, difunden principalmente la radiación solar incidente y absorben sólo una pequeña fracción. Para cerrarle el paso a la radiación, las nubes difusoras han de ser muy espesas, porque gran parte de la radiación se difunde hacia delante, en dirección a la superficie de la Tierra. (Recuérdese que las nubes ordinarias de agua suelen poseer un espesor óptico de 10 o más.)

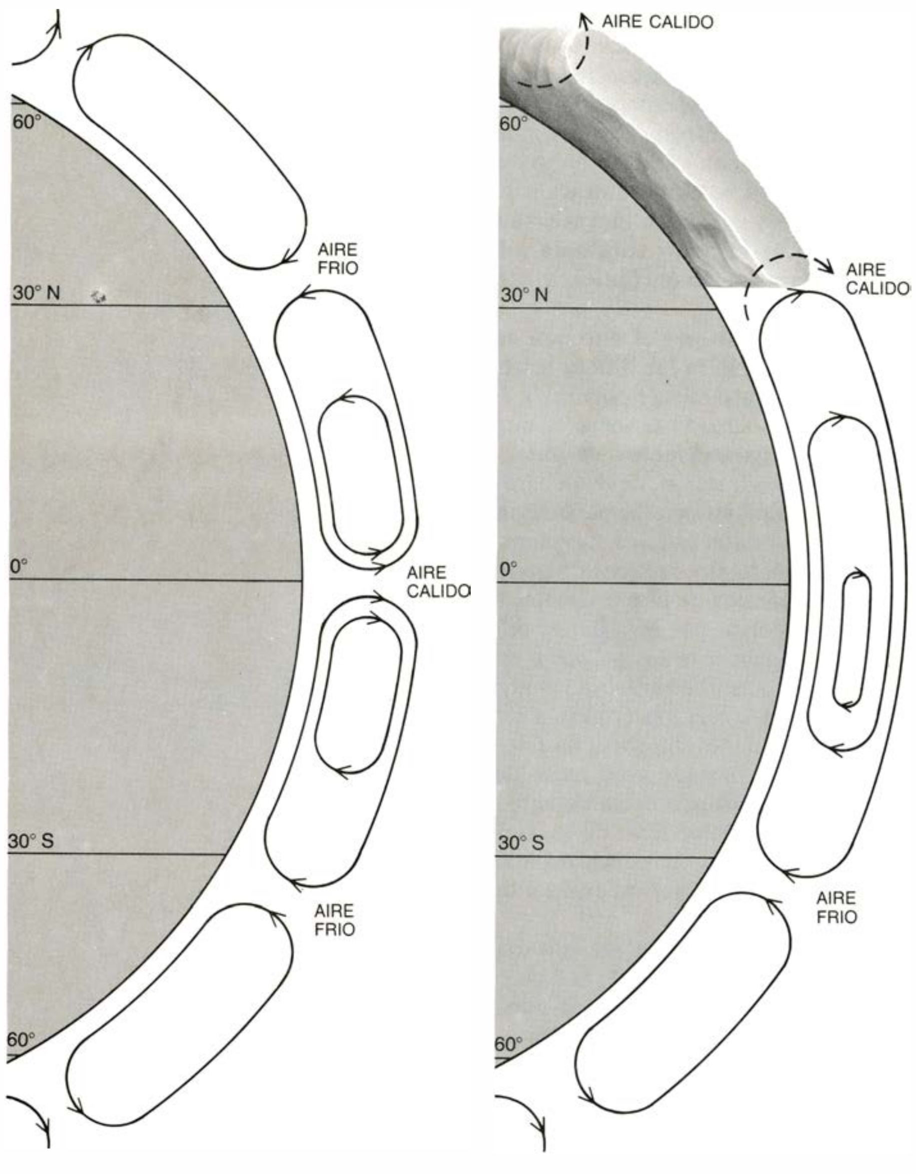
Hemos visto que, en muchos casos, la reducción substancial de la radiación solar tras una guerra nuclear persiste semanas y meses. En la primera o segunda, las nubes no cubrirían el cielo; de ahí que nuestros cálculos probablemente subestimen la irradiancia media en esas primeras fases. Sin embargo, en las zonas atacadas estaría demasiado oscuro para verse, incluso a mediodía.

La gran cantidad de humo generado por un ataque nuclear podría conducir a notables descensos de las temperaturas continentales durante un apreciable período. En muchos de los casos representados en las ilustraciones que acompañan a este artículo, las temperaturas en tierra permanecen bajo cero durante meses. Descensos de temperatura media de sólo unos grados en primavera o a principios de verano podrían destruir las cosechas en toda la zona templada septentrional. En el caso base, se predicen descensos de temperatura de unos 40 grados Celsius (hasta una media absoluta de −25 grados), y son posibles enfriamientos todavía mayores con los actuales arsenales nucleares y los previstos para un futuro próximo.

Los cambios de temperatura del aire predichos en función de la altitud y del tiempo, para nuestro caso base de 5000 megatones, revelan varias características interesantes. Primero, la atmósfera



9. COMPARACION DE LOS PERFILES de temperatura de la atmósfera antes y después de una guerra nuclear de 5000 megatones. La curva negra es el perfil de temperatura normal. Las otras curvas muestran el perfil un mes después de la guerra (*color oscuro*), tres meses después (*color intermedio*) y seis después del conflicto (*color claro*).



10. LAS CARACTERISTICAS DE LA CIRCULACION GLOBAL de la atmósfera podrían verse alteradas por una guerra nuclear a gran escala en el hemisferio Norte. En la primavera y verano de este hemisferio, la circulación global media en dirección meridiana (esto es, Norte-Sur) está dominada por una gran célula convectiva, llamada de Hadley, en la que el aire asciende encima de los húmedos y calientes trópicos, se divide en dos corrientes y desciende sobre las latitudes medias y subtropicales en ambos hemisferios, estableciendo células de circulación secundaria a latitudes más altas (*diagrama de la izquierda*). Si se introdujera una nube de humo y polvo, grande y densa, en la troposfera de la zona templada septentrional durante esas estaciones, el efecto de calentamiento troposférico, en el borde meridional de la nube, podría ser suficientemente intenso para invertir la corriente descendente normal de latitudes medias; convertiría entonces la circulación de Hadley en una circulación insólita, caracterizada por una única célula dominante con los vientos en altura soplando activamente a través del ecuador de Norte a Sur (*diagrama de la derecha*). Esta nueva configuración de la circulación se ha observado en modelos de ordenador de la circulación general atmosférica elaborados por investigadores americanos y soviéticos.

superior se calienta entre 30 y 80 grados Celsius cuando la radiación solar, que normalmente calienta el suelo, es absorbida por las capas más altas de humo. Al mismo tiempo, el suelo se enfría en la oscuridad. Las nubes calientes, como globos de aire caldeado, no permanecerían estacionarias, sino que se elevarían y expandirían.

Un mes después de un ataque nuclear generalizado, la troposfera que cubre los continentes alcanzaría el equilibrio térmico. Incluso tres meses después, sólo los contados kilómetros más bajos recibirían energía solar suficiente para impulsar una débil convección. La estratosfera descendería hasta la superficie, creando una atmósfera extraña. En algunos lugares, las corrientes cálidas de aire oceánico todavía se moverían sobre los continentes a ras del suelo, pero esa fuente de calor impulsaría la convección en el ámbito de los kilómetros inmediatos a la superficie. La intensa inversión de temperaturas amortiguaría eficazmente la actividad convectiva de gran alcance. En los demás lugares, el aire frío continental que se moviera sobre los océanos podría calentarse, ascender y volver a circular sobre los continentes para acabar por descender sobre el suelo.

Una posible consecuencia de la inversión de temperaturas causada por tal nube de humo sería un aumento en el tiempo de residencia del humo y el polvo en la atmósfera. Este resultado representa un efecto de realimentación positiva que no se ha tenido en cuenta hasta ahora en los cálculos y que agravaría la severidad del invierno nuclear y prolongaría su duración. La inversión de temperaturas reduce la penetración convectiva del aire húmedo desde abajo, inhibiendo la condensación de agua en el aire ahumado y limitando con ello en gran medida la precipitación a alturas superiores a algunos kilómetros. Cuanto más tiempo permanezcan el hollín y el polvo en la atmósfera, tanto más se esparcirán horizontalmente y tanto más se extenderá su efecto climático. Bajo esas condiciones, las partículas se eliminan principalmente por aglomeración continuada y deposición por transporte por los sistemas de vientos a escala global y por turbulencia hasta bajas alturas, donde aún se produce un lavado por precipitación.

Nuestras variaciones de temperatura calculadas sobre masas de tierra extensas no toman en cuenta el hecho de que inicialmente la cobertura nubosa sería parcial, ni tampoco la dilución subsiguiente de aire frío continental en aire marítimo caliente. Michael C. MacCracken, de Livermore, ha investigado los efectos combinados de la cobertura nubosa parcial y el intercambio de calor desde el océano, trabajando con un modelo de circulación general para seguir la pista de grandes masas de humo; ha trabajado también con un modelo climático bidimensional para calcular las temperaturas del suelo correspondientes a la emisión de humo en nuestro caso básico de 5000 megatones. Ha encontrado descensos de la temperatura media sobre el suelo que son aproximadamente la mitad de nuestros descensos de temperatura en el interior de los continentes. Ciertos cálculos todavía más complicados, con modelos tridimensionales de circulación general para condiciones semejantes a nuestras hipótesis del caso base confirman que pueden registrarse descensos de temperatura de entre 20 y 40 grados sobre vastas superficies continentales.

Los resultados de nuestros cálculos indican que los movimientos inducidos

en las nubes de hollín por absorción de radiación solar podrían hacer que dichas nubes se elevasen y se extendieran horizontalmente. El fenómeno podría acelerar tanto la dispersión de los penachos de humo en la fase inicial como su extensión global, proceso que, por lo demás, está dominado por la cizalladura del viento y las turbulencias. Recientemente, un grupo del Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), compuesto por Robert M. Haberle y dos de los autores (Ackerman y Toon), empleó un moderno modelo bidimensional de la circulación general para calcular el movimiento de nubes de hollín calentadas en la troposfera terrestre. El grupo de Ames consideró una nube de hollín uniforme situada entre 30 y 60 grados de latitud Norte; rodeaba la Tierra a esas latitudes y se extendía desde el suelo hasta una altura de ocho kilómetros. Esta simulación muestra grandes fragmentos de nube elevándose hasta la estratosfera y moviéndose rápidamente hacia el ecuador y el hemisferio Sur.

Aunque se trata de cálculos preliminares, respaldan una de las hipótesis más importantes de nuestro estudio inicial: que las nubes autopropulsadas de humo y polvo del hemisferio Norte podrían transportarse rápidamente al hemisferio Sur, en el que también causarían grandes anomalías climáticas. Tal dispersión acelerada podría dejar sentir sus efectos más drásticos en los trópicos de ambos hemisferios, donde los organismos autóctonos son extremadamente sensibles a la oscuridad y el frío. Un invierno nuclear que se extendiese hasta los trópicos representaría un desastre ecológico sin precedentes en la historia.

Nuestras especulaciones acerca de grandes perturbaciones meteorológicas y transporte interhemisférico tras un conflicto nuclear se han visto también respaldadas por complicados cálculos realizados con modelos tridimensionales de la circulación general. Estos modelos no están todavía diseñados para seguir el movimiento de polvo y humo como elementos trazadores o para efectuar los necesarios cálculos detallados de transprte radiativo de calor. Pese a ello, permiten establecer las perturbaciones tridimensionales iniciales en el viento y la temperatura causadas por inyecciones de humo de gran cuantía. Dos grupos de investigadores han realizado tales estudios climáticos avanzados: Curt Covey, Stephen H. Schneider y Starley L. Thompson, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) en Boulder (Colorado), y Vladimir V. Alexandrov y Georgi L. Stenchikov, del Centro de Cálculo de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética.

Las predicciones obtenidas por ambos grupos acerca de la circulación meridiana (Norte-Sur), normal y perturbada, de la atmósfera, varias semanas después de una ataque nuclear en el hemisferio Norte, en primavera o verano, conducen a la misma conclusión: la célula de Hadley, circulación que se bifurca en los trópicos, se transformaría en una única e intensa célula con fuertes vientos en la alta troposfera, soplando directamente del hemisferio Norte al hemisferio Sur. Ello constituiría un profundo cambio del sistema global de vientos.

Por circulación meridiana media se entiende el movimiento residual de ondas de oscilación planetaria a gran escala. Los modelos de circulación global predicen anomalías en los movimientos en forma de ondas planetarias; también aquí, los resultados son sorprendentes. El grupo del NCAR ha encontrado que masas de aire de tamaño continental calentadas podrían penetrar profundamente en el hemisferio Sur en cuestión de días. En esencia, todas las masas de tierra habitable del planeta podrían quedar sometidas al oscurecimiento por hollín. Los modelos de circulación global pronostican también temperaturas por debajo de cero sobre la mayor parte de las regiones continentales septentrionales. Lo llamativo es que la congelación local podría producirse en un plazo de dos o tres días; el grupo del NCAR se refiere a ello como "congelación rápida". Bajo tales circunstancias, ninguna región del globo, septentrional o meridional, quedaría libre del invierno nuclear.

Considerar la posible actividad meteorológica en la proximidad de las costas durante el invierno nuclear sugiere que, aun cuando la radiación solar incidente se redujera de forma importante, los océanos continuarían alimentando de calor y humedad la capa fronteriza de la atmósfera en la vecindad de las costas. En algunas regiones, los vientos fríos que soplan sobre la costa desde el continente interaccionarían con el entorno marítimo para producir intensas tormentas y grandes precipitaciones. En otras regiones, donde los vientos dominantes arrastran aire oceánico sobre los continentes, podría producirse espesas nubes estratiformes y precipitación continua. No se sabe hasta qué punto ese mal tiempo podría extender-

se hacia el interior del continente desde las costas; probablemente, el grueso de la actividad se desarrollaría en un radio de 100 kilómetros.

Se han planteado otras muchas preguntas acerca del invierno nuclear; por ahora permanecen sin respuesta. Con el rápido enfriamiento superficial, se formarían extensas nieblas que podrían afectar el balance de radiación de la superficie. La presencia de millones de toneladas de residuos nucleares en la atmósfera podría modificar las propiedades de las gotículas de agua de las nubes y, por tanto, la velocidad de eliminación de los residuos. Las nubes nucleares y las nubes naturales modificadas alterarían también el balance global de radiación de la atmósfera, pero las consecuencias sobre las temperaturas en superficie siguen siendo inciertas. Las variaciones diurnas, que todavía no se han tratado en los modelos climáticos aplicados al problema de la guerra atómica, podrían también influir en la dinámica y la eliminación de los residuos nucleares. El agua inyectada por explosiones e incendios podría afectar los procesos químicos y radiativos de la atmósfera. Todos esos efectos son importantes refinamientos de segundo orden de la teoría climática básica del invierno nuclear. Mas, con los datos existentes, ninguno de esos efectos parece ser capaz de alterar apreciablemente las principales influencias climáticas que ahora se pronostican para una guerra nuclear.

Tampoco se conoce bien la interacción entre la atmósfera y los océanos, de innegable influencia en los cambios climáticos a corto plazo. Por medio de lo que tal vez constituyó una serie de coincidencias, la erupción de El Chichón, en la primavera de 1982, fue seguida por un infrecuentemente intenso calentamiento de tipo El Niño en el Pacífico Sur, en el invierno de 1982 y primavera de 1983, asociado con una inesperada calma de los alisios meridionales. A esos sucesos siguió un tiempo poco corriente en Europa y Norteamérica en el invierno de 1982 y todo 1983. La mayor parte de Norteamérica sufrió un invierno gélido, como no se recordaba ya, mientras que Europa disfrutó de una templada primavera en diciembre. Aunque no existe prueba alguna de que esos sucesos estuviesen relacionados, las indicaciones sugieren un acoplamiento potencialmente significativo de corrientes oceánicas, vientos y tiempo en un período de tiempo bastante corto; tal relación todavía no se ha establecido rigurosamente.

Nuestro estudio consideró también cierto número de efectos climáticos secundarios de una guerra nuclear. Los incendios generalizados, la deposición de hollín sobre la nieve o el hielo y la modificación regional de la vegetación causan variaciones en el albedo o reflectividad de la superficie terrestre. Se evaluaron los cambios del albedo a corto plazo y se encontró que eran insignificantes comparados con la atenuación de la luz solar. Si se produjesen variaciones del albedo semipermanentes importantes, podrían seguirse variaciones en el clima a largo plazo. Por otra parte, la vasta fuente de calor oceánica actuaría después de toda perturbación importante, tratando de elevar al clima a los valores contemporáneos. Y así hemos llegado a la conclusión provisional de que no es probable que una guerra nuclear desencadenase un período glaciar.

También hemos analizado los efectos climáticos causados por cambios en la composición gaseosa de la atmósfera. La máxima perturbación de la temperatura hemisférica asociada a la producción de óxidos de nitrógeno y a la consiguiente reducción de la concentración de ozono es un enfriamiento de algunos grados Celsius. La concentración de los gases responsables del efecto de invernadero también quedaría modificada por una guerra nuclear; tales gases producirían un calentamiento en superficie de varios grados después de que el polvo y el humo desaparecieran. Estas perturbaciones compensadoras de temperatura son, sin embargo, inciertas, pues las variaciones químicas y físicas de la composición de la atmósfera producidas por una guerra nuclear estarían relacionadas mediante procesos no representados adecuadamente en los actuales modelos. Se tiene la firme intención de seguir estudiando este punto.

Las consecuencias reales de una guerra nuclear nunca se pueden predecir con precisión. Las interacciones sinérgicas entre los distintos procesos implicados podrían complicar el problema de la supervivencia para muchos organismos. La destrucción del entorno a largo plazo y la desorganización del ecosistema global podrían resultar todavía más devastadores para la especie humana que los temibles efectos a corto plazo de destrucción por las explosiones nucleares y su deposición radiactiva. A la vista de estas conclusiones, deben reconsiderarse las políticas estratégicas de ambas superpotencias y sus respectivas alianzas militares.

Bandeo de cromosomas

Las técnicas de bandeo se aplican en la identificación de los pares cromosómicos y la determinación del origen de las anomalías congénitas. Permiten establecer relaciones taxonómicas entre distintas especies

Felipe Cortés

Durante el último siglo, al tiempo que se ha ido progresando en el conocimiento de la estructura y la función de los cromosomas, se ha hecho patente cada vez más el papel fundamental que los mismos desempeñan en el conjunto de la biología. A finales de la década de 1870, Strasburger y Fleming estudiaron el comportamiento de estos cuerpos nucleares en células vegetales y animales, respectivamente. Gracias a sus investigaciones se llegó en pocos años a conocer los fundamentos de la división celular. Dada la espectacularidad de los fenómenos que ocurrían durante la mitosis (individualización de los cromosomas al condensarse la cromatina, división longitudinal en dos cromátidas o cromosomas hijos y reparto de los mismos entre las dos células hijas resultantes de la división), se prestó mayor atención a dicha etapa del ciclo de división celular; durante muchos años, se consideró que la interfase (período que transcurre desde que una célula se origina al dividirse otra hasta que ella entra a su vez en mitosis) era un período de reposo.

Semejante esquema descriptivo obedecía a que el núcleo celular presenta un aspecto bastante homogéneo y estable durante la interfase y resulta imposible distinguir a los cromosomas en su individualidad. Pero las investigaciones posteriores se encargarían de demostrar que la interfase constituye el período de máxima actividad nuclear, durante el cual se llevan a cabo la mayor parte de las síntesis necesarias para el crecimiento y reproducción de la célula: síntesis de ácidos nucleicos y proteínas, fundamentalmente.

Aproximadamente por el mismo tiempo comenzaron los trabajos en otros dos campos que entonces aún eran independientes entre sí, pero en los que con el paso de los años se evidenciaría una estrecha relación, así como la importancia que dicha relación tendría para el conocimiento del cromosoma. Se trataba de la genética y la citoquímica de los ácidos nucleicos. En 1875, Hertwig había observado que el número de cromosomas se duplicaba al fundirse los dos núcleos gaméticos en la fecundación, extremo que fue confirmado por Van Beneden en 1883, quien además afirmó que los cromosomas de la descendencia derivaban, por partes iguales, de los que existían en los gametos de los padres.

Este descubrimiento planteaba el problema de que en cada generación se duplicaría el número cromosómico; pero esto fue aclarado por el mismo Van Beneden cuando, como resultado de sus estudios de la ovogénesis en *Ascaris*, llegó a demostrar que los núcleos de las células sexuales o gametos destinados a fusionarse en la fecundación sólo contenían la mitad del número de cromosomas presentes en las células no sexuales o somáticas del organismo. Tal afirmación trajo como consecuencia el estudio del fenómeno llamado "reducción cromosómica", o meiosis, mediante el cual es posible llegar al estado de haploidía de los gametos (n cromosomas) a partir de células diploides ($2n$ cromosomas) iguales a las somáticas del mismo organismo en cuanto al número cromosómico.

En 1882, Fleming había demostrado que, para cada especie, el número de cromosomas presentes en las células era constante; Roux, en 1883, estudiando el comportamiento de los cromosomas en la meiosis dedujo su implicación en la herencia. Esta idea fue luego desarrollada por Weisman, quien publicó en 1887 una serie de principios que constituyeron la base de la teoría cromosómica de la herencia. Aunque hoy día se reconoce que la genética tuvo su origen formal con la publicación en 1865 de los trabajos de Gregor Mendel, por ser quien primero estudió sistemáticamente el problema de la naturaleza de la transmisión de los caracteres hereditarios, fue a partir de 1900, con el redescubrimiento de los trabajos de Mendel por de Vries, Correns y Tchermak cuando dicha ciencia cobró su impulso definitivo. No hubo de transcurrir mucho tiempo hasta que Sutton (1903) y Boveri (1904) señalasen que los cromosomas eran los cuerpos nucleares que mostraban exactamente el tipo de comportamiento que podía esperarse de las que hasta entonces se habían denominado "partículas hereditarias", responsables de transmitir los caracteres a la descendencia.

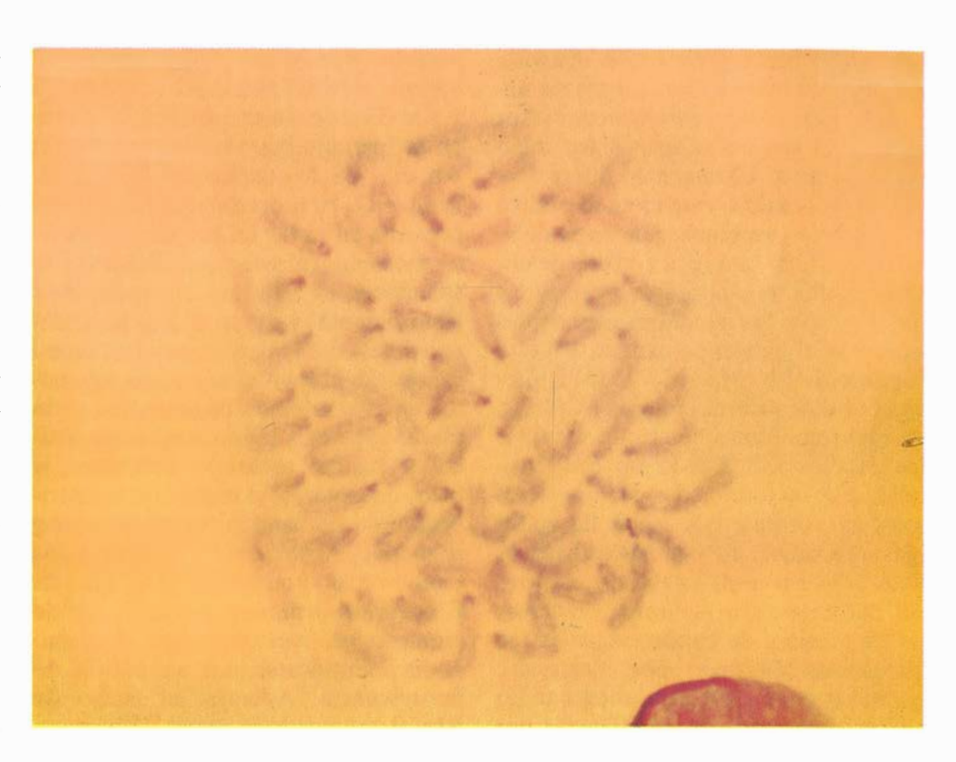
A partir de ese momento, los estudios cromosómicos y genéticos han ido unidos, iniciándose el desarrollo de una parcela de la biología de la cual participan la citología y la genética: la citogenética. El objetivo principal de esta nueva ciencia ha sido el estudio de las bases citológicas que pudiesen explicar satisfactoriamente los fenómenos hereditarios. Al tiempo que Sutton proponía su teoría cromosómica de la herencia, Mc Clung publicaba el primer caso de determinación cromosómica del sexo, con lo cual se postulaba que el sexo del individuo estaba determinado también por ciertos cromosomas, llamados por ello cromosomas sexuales. Esto permitió luego poder explicar la herencia ligada al sexo, es decir, la localización de determinados genes en los cromosomas sexuales, descubierta en 1906 por Doncaster y Raynor. En 1913 Sturtevant propuso que los genes se disponían en los cromosomas formando series secuenciales ordenadas, sentando las bases para que Morgan y colaboradores iniciasen en los años treinta sus estudios acerca de la localización de los genes (cartografía o mapeo) en los cromosomas de *Drosophila melanogaster* (la mosca del vinagre).

Si bien las técnicas citológicas de aplastado y extendido estaban lo suficientemente desarrolladas como para llegar a determinar el cariotipo (es decir, el número y la forma característi-

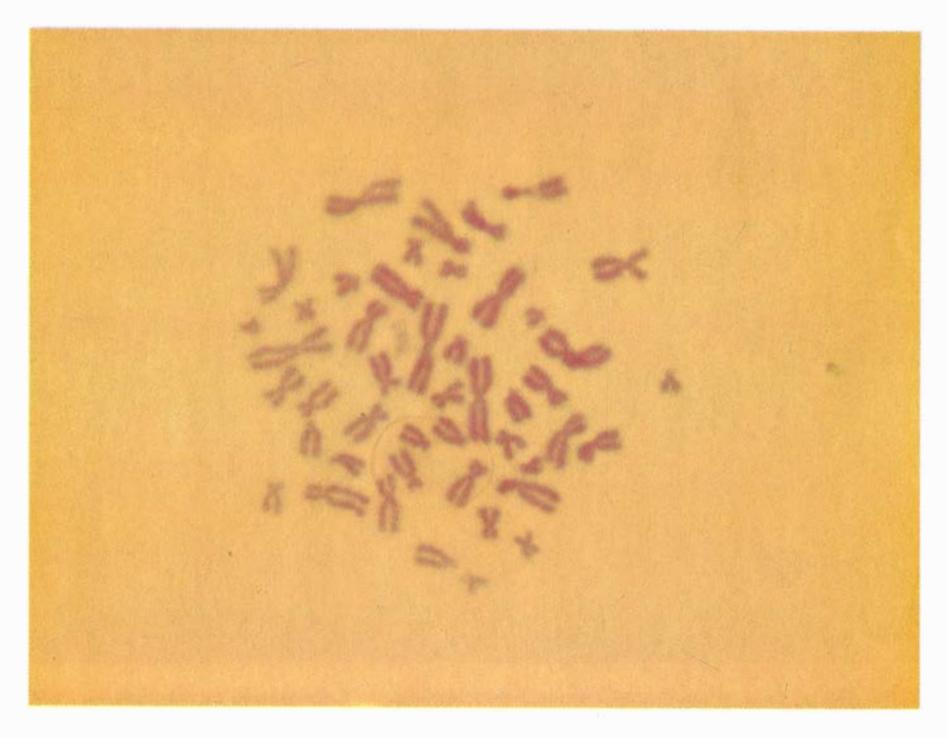
ca de los cromosomas) de cualquier especie animal o vegetal, hace aproximadamente quince años se tropezaba aún con el problema siguiente: a excepción de algunos casos en que los cromosomas presentaban notables diferencias entre sí, eran muy pocas las características morfológicas con las que contaban los citogenetistas para diferenciar claramente entre sí a los distintos pares de cromosomas homólogos que constituían el complemento diploide. Unicamente el tamaño, la posición de la constricción primaria o centrómero (que permite establecer la proporción existente entre los brazos del cromosoma) y la presencia en determinados cromosomas de constricciones secundarias constituían la ayuda, a veces insuficiente, con que se contaba a la hora de construir el cariotipo, sobre todo en aquellas especies que manifiestan diferentes pares de cromosomas con una morfología muy similar, como es, por ejemplo, el caso de *Drosophila virilis* ($2n$:12, o sea, 6 pares de cromosomas homólogos), en cuyo complemento cromosómico son cinco los pares de homólogos muy semejantes entre sí.

A finales de los años veinte, Heitz llegó a la conclusión de que en los cromosomas existían dos tipos de cromatina, la llamada eucromatina, que se condensaba durante la mitosis y se descondensaba en la interfase, y la heterocromatina, que tenía la propiedad de permanecer condensada durante todo el ciclo celular. Esta heterocromatina se encuentra siempre localizada en determinadas regiones de los cromosomas; en la interfase aparece en forma de unos grumos o cromocentros que se tiñen intensamente, a diferencia del resto de la cromatina (eucromatina), que permanece descondensada y de apariencia homogénea. No obstante, la localización particular de la heterocromatina en los cromosomas no resultó de gran ayuda para la construcción de cariotipos; ya que en la metafase, que es la etapa de la mitosis idónea para los estudios morfológicos, al estar también la eucromatina en su estado de máxima condensación queda enmascarada la heterocromatina, tiñéndose intensamente los cromosomas hasta el punto de no distinguirse los cromocentros.

En 1940, Darlington y LaCour publicaron un nuevo método para obtener la diferenciación longitudinal de los cromosomas; según el mismo, después de someter a una temperatura de 0 grados Celsius durante largos períodos los cromosomas de las plantas liliáceas del género *Paris* y *Trillium*, éstos



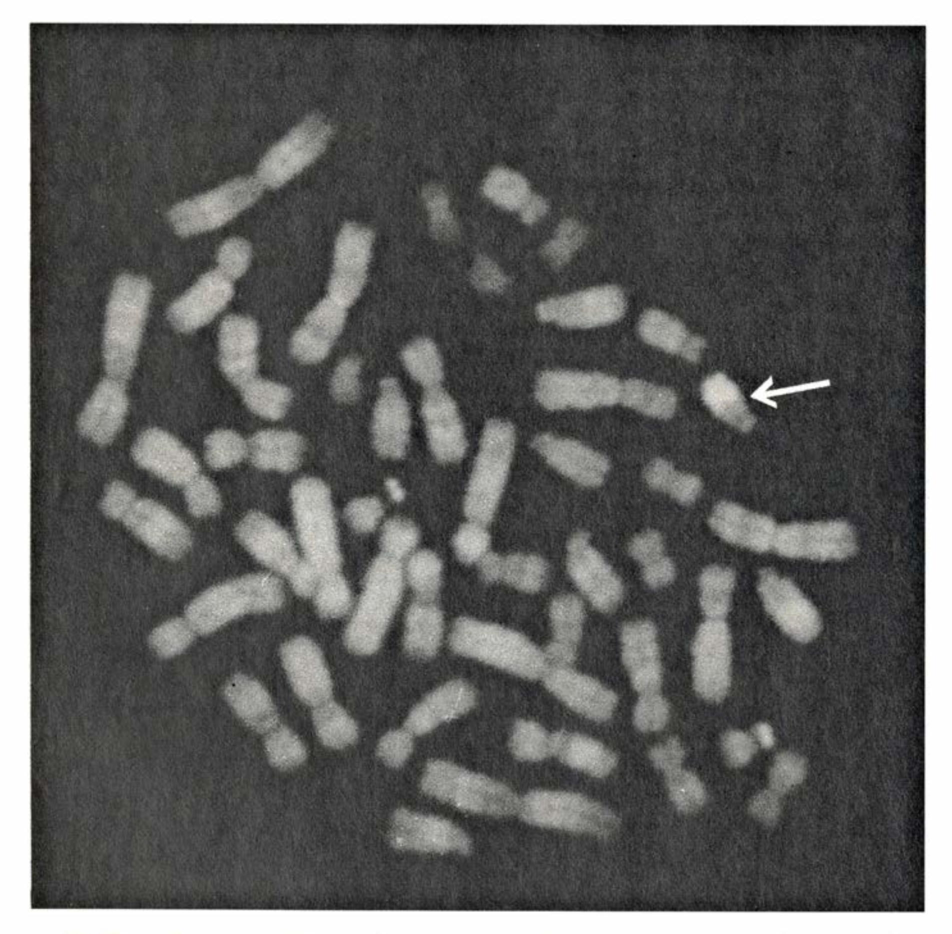
1. CROMOSOMAS METAFASICOS del ratón de laboratorio (*Mus musculus*), en los que puede apreciarse la tinción preferencial con Giemsa de las regiones pericentroméricas. La técnica empleada (bandeado *C*) es idónea para poner de manifiesto la llamada heterocromatina constitutiva, que permanece condensada a lo largo de todo el ciclo celular excepto durante el breve período de tiempo en que tiene lugar su replicación; si no fuese por dicha técnica, el alto grado de condensación del resto de la cromatina (eucromatina) durante la mitosis impediría que pudiera verse la heterocromatina. Durante la mitosis se produce la individualización de los cromosomas por condensación de la cromatina, división longitudinal en dos cromátidas o cromosomas hijos y reparto de los mismos entre las dos células hijas. El bandeo *C* de los cromosomas fue demostrado en 1970 por M. L. Pardue y J. G. Gall, del departamento de biología de la Universidad de Yale, al llevar a cabo un experimento destinado a determinar la localización del ADN satélite (repetitivo) en los cromosomas de ratón por medio de la hibridación in situ de ácidos nucleicos.



2. METAFASE HUMANA obtenida mediante el cultivo de linfocitos y teñida por medio de la reacción citoquímica de Feulgen y Rossenbeck, específica de la desoxirribosa. Las técnicas de bandeo cromosómico, desarrolladas a partir de finales de los sesenta, han contribuido decisivamente a la fácil identificación de los diferentes pares de cromosomas homólogos que constituyen el cariotipo. (Fotografía del autor.)

mostraban bandas que no se teñían al emplear los métodos ordinarios de tinción. En los núcleos interfásicos dichos segmentos aparecían, asimismo, como cromocentros claramente diferenciados. Pero tampoco este método obtuvo la aceptación esperada; reticencia debida, sobre todo, a que el número de mitosis es muy bajo a tal temperatura y a que no todas las metafases observadas muestran el patrón de bandas. En este capítulo de los esfuerzos de los citólogos por descubrir diferencias a lo largo de los cromosomas hemos de recordar los estudios acerca de la especial sensibilidad de determinadas regiones cromosómicas frente a la acción de múltiples agentes físicos y químicos capaces de producir roturas en dichas estructuras nucleares. Un auténtico precursor de las técnicas de bandeo actuales fue el método diseñado por Yamasaki, quien logró, en 1956, excelentes bandas en cromosomas de orquídeas por medio de un tratamiento ácido combinado con la tinción con orceína.

El sueño de los citogenetistas de conseguir diferenciar longitudinalmente los cromosomas metafásicos empezó a hacerse realidad cuando T. Caspersson y sus colaboradores pusieron a punto en el Instituto Karolinska de Estocolmo, en 1968, lo que hoy conocemos por bandeo *Q*. El procedimiento empleado consistía en tratar las preparaciones de cromosomas (previamente fijados) con soluciones de mostaza de quinacrina (fluorocromo) y observar luego los cromosomas en un microscopio de fluorescencia. Se obtuvo el resultado siguiente: en cromosomas de animales y de plantas aparecía un patrón característico de bandas oscuras y brillantes, si bien, en general, el número y la distribución de las bandas era mayor en los primeros. Al aplicar su técnica a los cromosomas humanos, el grupo de Caspersson demostró que cada par de cromosomas del cariotipo humano podía identificarse por su patrón de fluorescencia. Además, el hecho de que el cromosoma sexual *Y* humano presentara una fluorescencia especialmente fuerte en la parte distal de su brazo largo permitía distinguirlo, incluso en los núcleos interfásicos.

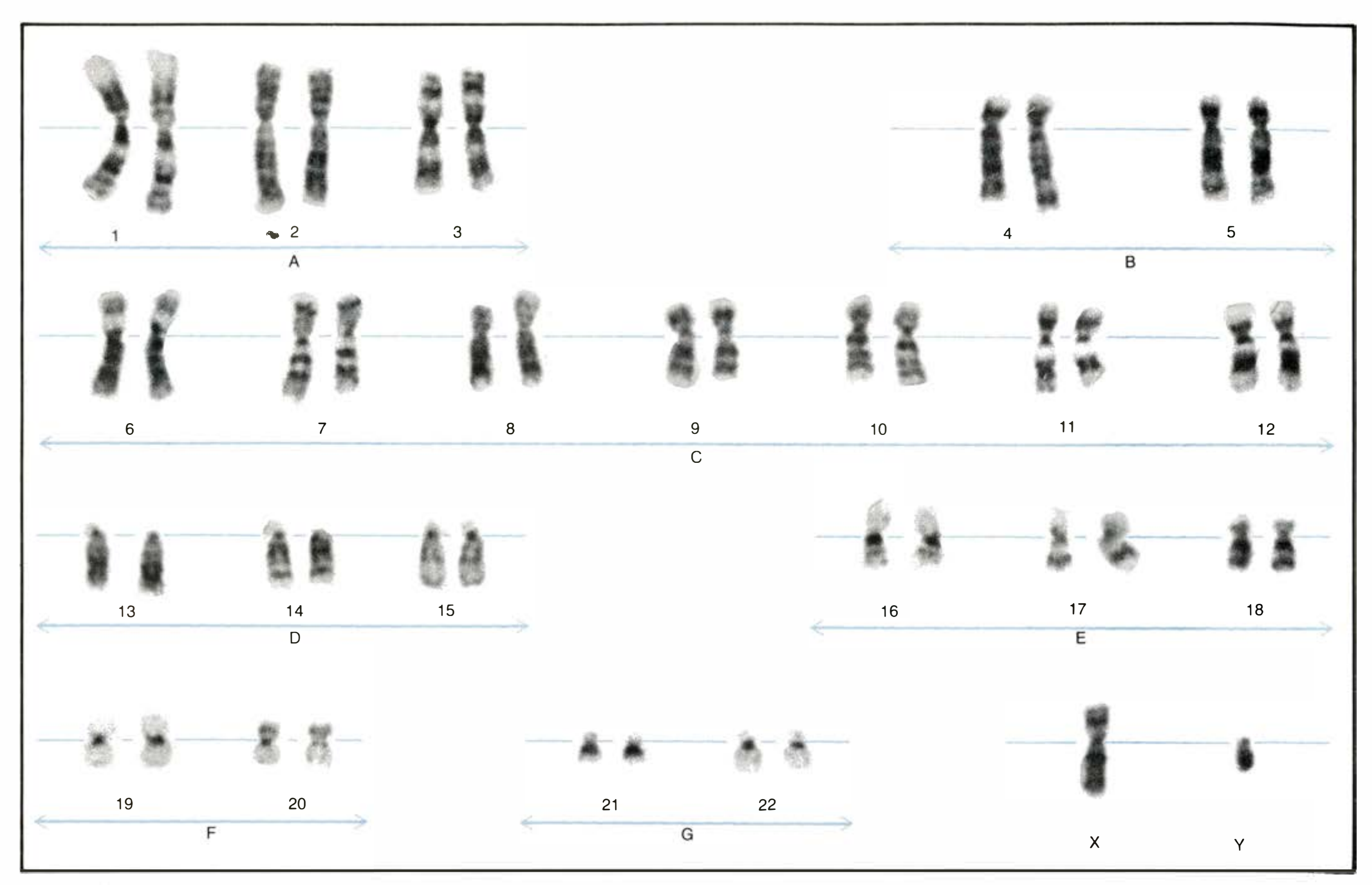


3. BANDEO *Q* de los cromosomas humanos: técnica iniciada por T. Caspersson y colaboradores. Cada par de cromosomas del cariotipo humano puede ser identificado por su especial patrón de fluorescencia. Se llama la atención sobre la fluorescencia especialmente intensa que se observa en la parte distal del cromosoma sexual *Y* (*flecha*); puede detectarse su presencia incluso en núcleos interfásicos. A pesar de la importancia y utilidad del bandeo *Q*, ofrece el grave inconveniente de que la fluorescencia se extingue al cabo de cierto tiempo, por cuya razón no puede contarse con preparaciones citológicas permanentes.

Estos descubrimientos supusieron una revolución en el campo de la citogenética, que exigió un replanteamiento de los numerosos casos estudiados con anterioridad. Denominóse a la técnica bandeo *QM*, por pensarse que era la mostaza la responsable de la unión a la molécula de ADN; mas al demostrarse posteriormente que no había tal, se le ha dado en llamar bandeo *Q*. La técnica presenta un grave inconveniente: las preparaciones citológicas obtenidas no son permanentes, pues la fluorescencia se extingue tras cierto tiempo de observación. Amén de resolver este problema, las técnicas más recientes de tinción con Giemsa, luego de diferentes tratamientos, han revelado unos patrones de bandeo cromosómico más detallados que los obtenidos mediante el bandeo *Q*.

En 1970, al llevar a cabo un experimento destinado a determinar la localización del ADN satélite (altamente repetitivo) en los cromosomas del ratón mediante hibridación *in situ* de ácidos nucleicos, Pardue y Gall observaron que las áreas cromosómicas donde se localizaba el ADN satélite (los centrómeros de todos los autosomas y el cromosoma sexual *X*) se teñían intensamente con Giemsa, a diferencia del resto de las regiones cromosómicas. Este resultado, que constituía una novedad y que no había sido el objetivo del experimento, recibió la siguiente interpretación: los tratamientos a que se habían sometido los cromosomas para desnaturalizar su ADN, y lograr que renaturalizase en las regiones correspondientes el ARN complementario radiactivo añadido, habían causado un efecto diferente según las regiones cromosómicas. A idénticos resultados llegaron Arrighi y colaboradores en cromosomas humanos. (Se bandean las regiones centroméricas, zonas pericentroméricas de determinados cromosomas y el área medio-distal de los brazos largos del cromosoma sexual *Y*.)

Se infería que lo que se teñía intensamente era lo que se venía denominando heterocromatina constitutiva, y que cada cromosoma tenía su cantidad y localización características de esta heterocromatina. Era, pues, la primera vez que la heterocromatina constitutiva podía ponerse de manifiesto en cromosomas metafásicos, sin quedar enmascárada por la alta condensación de la eucromatina en los mismos. La noción de heterocromatina constitutiva se aplica a la heterocromatina que siempre permanece condensada y no contiene genes estructurales en su ADN (se-



4. CARIOTIPO HUMANO BANDEADO mediante la técnica del bandeo *G*, obtenido por J. A. Abrisqueta, del Instituto de Genética del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, de Madrid. Además de resolver el problema de la rápida caducidad del bandeo *Q*, la técnica de bandeo *G* permite poner de manifiesto unos patrones más detallados; se usa para el diagnóstico genético. El patrón de bandas *G* es básicamente idéntico al que se consigue por medio del *Q*; las bandas intensamente teñidas por Giemsa se corresponden con las bandas *Q* altamente fluorescentes obtenidas al teñir con quinacrina.

cuencias de ADN que se transcriben en ARN mensajero para la síntesis de proteínas estructurales de la célula). La heterocromatina facultativa, por contra, sí contiene genes estructurales; permanece condensada y genéticamente inactiva sólo en determinadas circunstancias fisiológicas y dependiendo del estado del desarrollo. A diferencia de la constitutiva, la facultativa se presenta en uno sólo de los dos homólogos a un determinado nivel. El ejemplo más típico de esto último en humanos es la heterocromatinización facultativa de uno de los dos cromosomas *X* de la hembra, que se vuelve genéticamente inerte.

El procedimiento de bandeo *C*, relativamente simple, consiste en tratar las preparaciones cromosómicas con una solución alcalina fuerte (hidróxido bárico o hidróxido sódico) después de una breve exposición al ácido clorhídrico y, finalmente, con una solución salina a 55-60 grados C, tiñendo por último en solución Giemsa. Si bien es típico el bandeo *C* centromérico en los cromosomas de mamíferos, lo normal en vegetales es que se bandeen las regiones teloméricas de los cromosomas, tal como indican los resultados obtenidos por diferentes autores, así como los personalmente alcanzados en el Instituto de Biología Celular y en el departamento de citología de la Universidad Autónoma de Madrid. Hemos podido observar, sin embargo, que existen notables excepciones, como es el caso del ajo (*Allium sativum*), cuyos cromosomas muestran únicamente bandas *C* en la constricción secundaria existente en tres pares, así como en los telómeros de dos pares y a nivel intersticial en un solo par.

Otros procedimientos de bandeo que han resultado de importancia fundamental para los estudios citogenéticos son los que pueden englobarse bajo la denominación de bandeo *G*. Tuvieron su origen en una serie de trabajos en cromosomas humanos aparecidos en 1971; consisten en incubar preparaciones cromosómicas en alguna solución salina (con o sin tratamiento previo con álcalis) y teñir posteriormente con solución Giemsa. Otras variantes permiten tratar con soluciones de urea o detergentes, pero hay que señalar que actualmente el método que se ha impuesto sobre los demás es el que emplea un tratamiento enzimático suave con una proteasa (normalmente tripsina). El patrón de bandas así obtenido es básicamente idéntico al que se consigue mediante el bandeo *Q*; las bandas teñidas intensamente con Giemsa se corresponden con las bandas *Q* fuertemente fluorescentes que aparecen al teñir con quinacrina. Equivalencia que no es absoluta, como puede verse en el caso del cromosoma *Y* humano, que posee un segmento con fuerte fluorescencia que no se bandea mediante la técnica del bandeo *G*. Este, aparte de facilitar preparaciones cromosómicas bandeadas permanentes, presenta, sobre el bandeo *Q*, la ventaja de proporcionar un patrón de bandas más detallado; lo que implica un mayor auxilio a la hora de identificar los pares de cromosomas homólogos de un complemento. A la heterocromatina que pone de manifiesto el bandeo *Q* y *G* se le llama heterocromatina intercalar. Importa señalar que el patrón de bandas que se obtiene en cromosomas vegetales es prácticamente el mismo cualquiera que sea la técnica de bandeo de las hasta ahora mencionadas que les apliquemos.

El bandeo *R*, diseñado por Dutrillaux y Lejeune en 1971, puede consi-

derarse una variante del bandeo *G*. Debe su nombre a que el patrón de bandas que se obtiene es como el “reverso” del *G*; las bandas teñidas fuertemente con Giemsa mediante el bandeo *G* se tiñen débilmente al aplicar el bandeo *R*, y viceversa. La técnica consiste, en este caso, en someter las preparaciones cromosómicas a una breve incubación en tampón fosfato (*p*H 6,5) a alta temperatura (86-87 grados Celsius) y teñirlas finalmente con Giemsa, aunque también puede emplearse el fluorocromo naranja de acridina. La utilidad del bandeo *R* no hay que buscarla en la construcción de cariotipos, para lo cual se emplea normalmente el bandeo *G*, sino en la ayuda que presta en los estudios encaminados a desentrañar el mecanismo del bandeo *G*, habida cuenta del carácter de complementariedad que distingue a los mismos. Cuando el bandeo *G* no tiñe los telómeros, habrá que recurrir al *R*, si queremos identificarlos, pues no destacan del fondo.

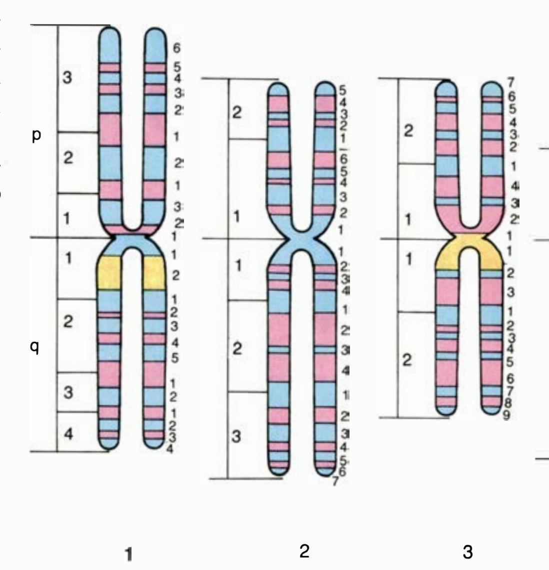
En 1973, Matsui y Sasaki publicaron un método de bandeo por medio del cual se ponía de manifiesto un tipo de heterocromatina constitutiva asociada a las regiones de los cromosomas (normalmente constricciones secundarias), en las cuales se organiza el nucleolo. Dichas regiones cromosómicas han recibido el nombre de regiones NOR (Nucleolar Organizer Region); en ellas se encuentran localizadas las secuencias de ADN necesarias para la síntesis (transcripción) del ARN ribosómico. Normalmente, basta una sola copia de cada gen por complemento haploide para satisfacer los requerimientos que una célula exige de un determinado producto codificado por dicho gen. Ahora bien, para ciertos productos la demanda celular es tan grande, que un simple gen se ve incapaz de hacer frente a la misma. Este es el caso del ARN ribosómico (ARNr). La cantidad de ARNr que requiere una célula eucariótica somática para la construcción de sus ribosomas es tal que son necesarias entre 100 y 150 copias repetidas del gen (ADNr) para dicho ARNr. Dichas copias, dispuestas en tándem, se agrupan en segmentos cromosómicos específicos, las mencionadas regiones organizadoras del nucleolo. En interfase, estas copias repetidas de ADN transcriben moléculas precursoras de ARNr que se asocian con proteínas específicas para formar el nucleolo.

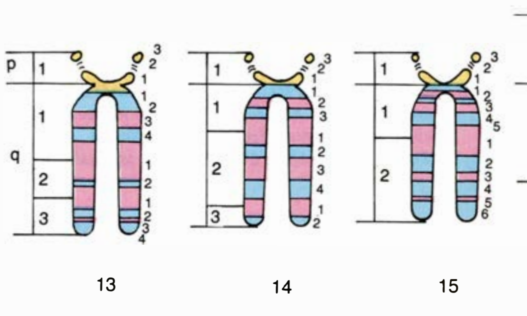
Las técnicas de bandeo *N* son, por tanto, de gran utilidad para determinar el número total y la localización de los organizadores nucleolares (NOR) funcionalmente activos en los complementos cromosómicos de animales o plantas. El método consiste en teñir selectivamente los NOR con Giemsa, tras someter las preparaciones a una breve incubación (unos diez minutos) en una solución de ácido tricloroacético a alta temperatura o a una digestión con determinadas enzimas: ADNasa o ARNasa. Más tarde, el método se mejoró con la introducción de una incubación en tampón fosfato a 90 grados C, después de la cual se lavan las preparaciones en el mismo tipo de solución, a 0 grados C, y se tiñen con Giemsa durante unos minutos.

Otro método para teñir selectivamente los NOR es el desarrollado por Howell y colaboradores, en 1975, por medio del nitrato de plata. Por emplearse, en un comienzo, plata amoniacal y creerse que lo que se teñía específicamente eran los satélites de los cromosomas acrocéntricos humanos, el método se denominó “AS-SAT”. Hoy se sabe que lo que realmente tiñe la plata son las constricciones secundarias y no los satélites. Se ha podido comprobar, asimismo, que la solución de plata amoniacal no es esencial para la tinción selectiva de los NOR; basta la solución de nitrato de plata para teñirlos, si se coloca una gota de la misma sobre la preparación y se incuba durante unas 18 horas a 37 grados C o entre 2 y 5 horas a 50 ºC para el revelado. Este método, y otros de más reciente desarrollo que han logrado una rápida tinción y obviar los problemas de falta de reproducibilidad, han recibido la denominación general de métodos “Ag-NOR”.

Finalmente, Wang y Juurlink lograron, en 1979, teñir los NOR en cromosomas de hamster chino sirviéndose de un colorante específico de proteínas, el azul coomasie brillante. Este método, en fase experimental todavía, puede terminar sustituyendo, por su rapidez y sencillez, a todos los desarrollados hasta la fecha.

En los últimos años se han localizado los NOR en unas 90 especies animales y en sólo 3 especies vegetales. La mayoría se han detectado mediante métodos Ag-NOR. El escaso número de plantas en que se han localizado los NOR se explica por las mayores dificultades técnicas que se presentan en dicho material. Por nuestra parte, en el departamento de citología de la Facultad de Biología de la Universidad de Sevilla, empleando una técnica muy simple de bandeo *N* basada en una breve incubación en tampón fosfato a alta temperatura y posterior tinción con

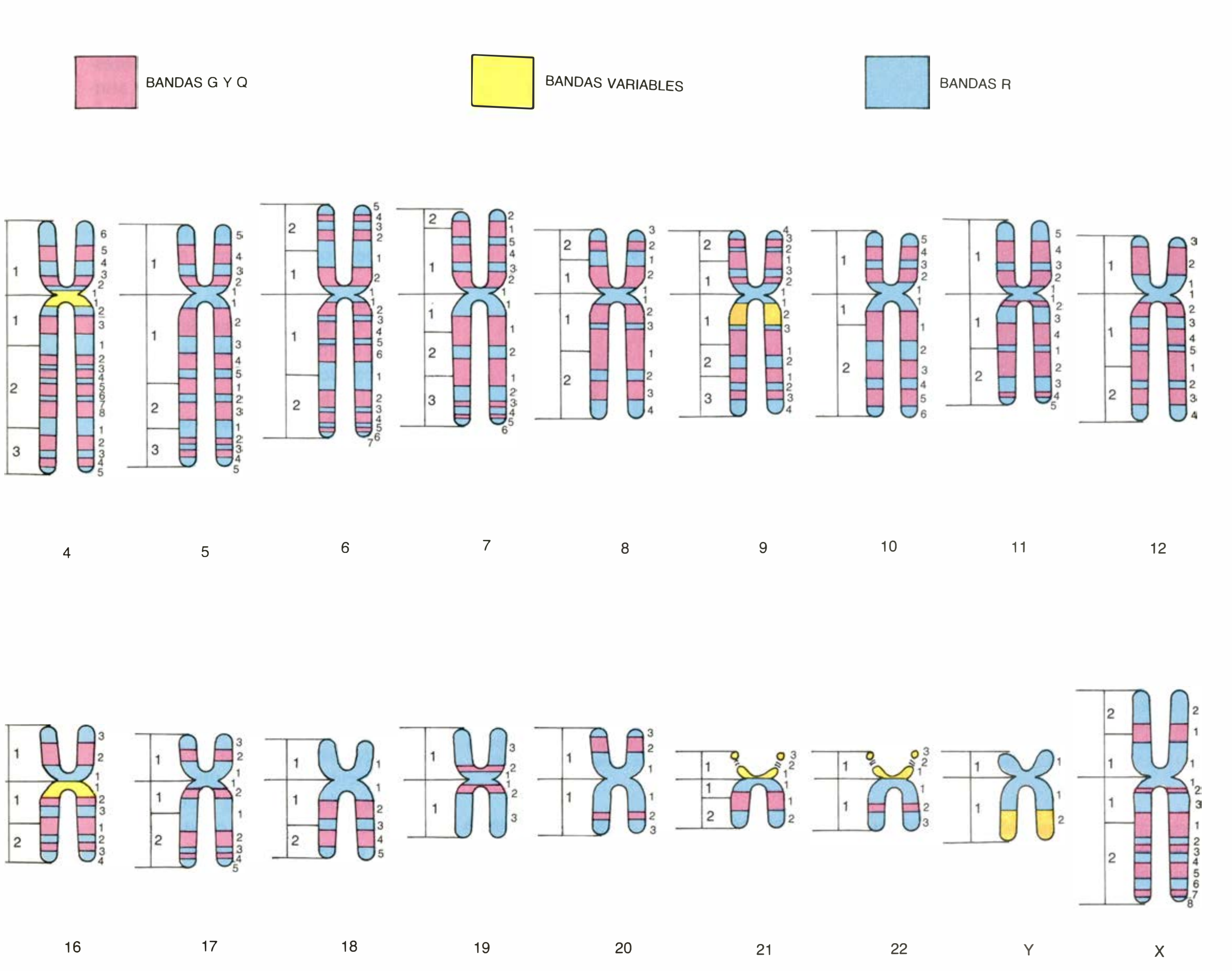




5. DIAGRAMA DE BANDAS observadas en los cromosomas humanos (excepto las bandas *C* y las

Giemsa hemos logrado teñir los NOR en varias especies de liliáceas. La mayoría de las especies animales presentan sus NOR en pares autosómicos; sólo en seis especies de las estudiadas se han encontrado NOR en los cromosomas sexuales (normalmente asociados con el cromosoma sexual *X*).

El bandeo de los cromosomas puede obtenerse también gracias a la acción de diferentes drogas que alteran el ADN. El más usado de estos agentes ha sido la 5-bromodesoxiuridina (BrdU), capaz de sustituir a la timidina en el ADN cuando se está llevando a cabo la síntesis del mismo. La presencia de BrdU en el ADN confiere a éste una serie de propiedades especiales que se ponen de manifiesto en el plano citológico, dada la especial sensibilidad de las fibras de nucleoproteínas (ADN y proteínas asociadas) bromosustituidas. Pioneros de este tipo de bandeo fueron Zakharov y Egolina en 1972, quienes

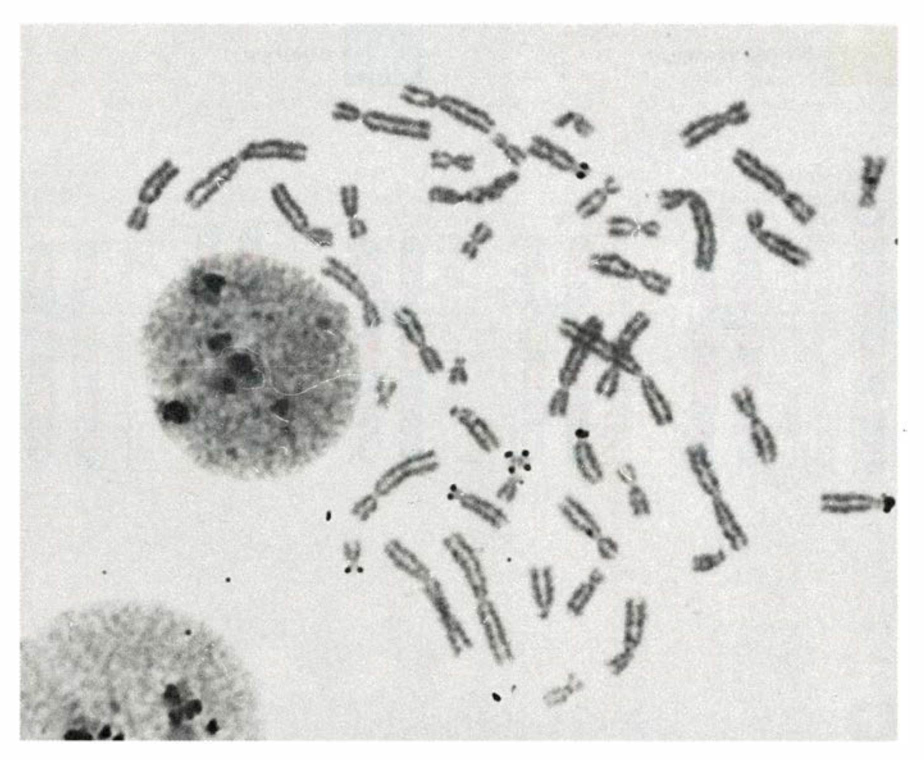


bandas *BrdU*), así como el sistema de numeración para las mismas adoptado por la Conferencia de París de 1971. En cuanto al bandeo *C*, hay que señalar que existe una gran variabilidad dentro de la población humana, lo que impide instaurar un patrón general, como se ha hecho con las *Q*, *G* y *R*.

observaron que los segmentos cromosómicos bromosustituidos mostraban en metafase un grado de condensación menor de lo normal, por cuya razón se teñían menos intensamente. A este descubrimiento siguió una serie de trabajos acerca de la incorporación de BrdU en diferentes momentos del período de síntesis de ADN (período *S* de la interfase) y la posterior detección citológica en metafase del patrón de bandas correspondiente. Entre estos trabajos cabe destacar los llevados a cabo por Samuel A. Latt en cromosomas humanos, empleando la microscopía de fluorescencia. El método usado por Latt consiste en aprovechar la capacidad que tiene la BrdU de extinguir la fluorescencia de ciertos fluorocromos; en los cromosomas metafásicos aparecen bandas brillantes y oscuras características según el momento del período *S* precedente en el que se incorporó la droga en el ADN. Al no poder obtenerse preparaciones citológicas permanentes, hemos recurrido a la técnica llamada FPG ("Fluorescent Plus Giemsa"), gracias a la cual se tiñen más intensamente con Giemsa las regiones cromosómicas menos bromosustituidas, y hemos observado en varias plantas del género *Allium* un patrón característico de bandas, una vez que la BrdU se incorporase en diferentes momentos del período *S*.

Aparte de las bandas obtenidas con la incorporación de BrdU, no ha podido hasta la fecha dilucidarse la cuestión de la naturaleza intrínseca de los distintos tipos de bandeo cromosómico. Los estudios llevados a cabo en este sentido han tendido tanto a explicar la especial naturaleza química de las zonas cromosómicas bandeadas como a investigar el papel estructural y funcional que las bandas pudieran desempeñar en la organización del cromosoma.

Aunque la fijación de los cromosomas en soluciones que contienen ácido acético parece ser condición esencial para que se produzca el bandeo *G*, no ocurre así en el caso del bandeo *Q* o del bandeo *C*. Es sabido que el ácido acético, además de precipitar nucleoproteínas, extrae histonas (proteínas muy básicas) de la cromatina: podemos, pues, considerar que los cromosomas fijados están formados por ADN con una pequeña cantidad de proteínas asociadas (presumiblemente, la mayoría no histónicas). Una cuestión muy debatida concierne a la relación entre las bandas y las diferencias de cantidad de ADN o proteínas que se presentan. En sendos estudios independientes realizados por Caspersson y Sumner, se llegó a la conclusión de que la distribución de ADN y proteínas era bastante uniforme a lo largo de los cromosomas (excepto en lo que respecta a las constricciones primarias y secundarias, naturalmente). Por



6. ORGANIZADORES NUCLEOLARES (NOR) ACTIVOS; pueden teñirse específicamente gracias a las técnicas de bandeo *N*. En la micrografía se aprecia dicho bandeo *N* en una metafase humana, así como en núcleos interfásicos. Merece resaltarse la presencia, en el centro, de un pequeño cromosoma metacéntrico bisatelizado con los NOR en ambos extremos. En estas regiones cromosómicas (normalmente constricciones secundarias) se encuentran localizadas las secuencias de ADN necesarias para la transcripción del ARN ribosómico. El método empleado en este caso concreto es la técnica denominada Ag-NOR.

contra, otros autores, así McKay y Prescott, sí han encontrado una correspondencia entre la concentración de ADN y las bandas en cromosomas fijados. De cualquier modo, no parece probable que las bandas observadas por medio de las distintas técnicas hallen su justificación sólo en el diferente contenido en ADN o proteínas a lo largo del cromosoma.

Por lo que respecta, en particular, al bandeo *Q*, se le supuso en un principio que era un reflejo de la distinta composición de bases del ADN a lo largo del cromosoma, de manera que a las regiones ricas en GC (guanina, citosina) se uniría más cantidad de quinacrina (al tener afinidad por los residuos de guanina). Estudios posteriores demostraron, sin embargo, que el ADN en solución rico en AT (adenina, timina) tendía a favorecer la fluorescencia de la quinacrina, mientras que el ADN rico en GC tendía a extinguir dicha fluoresencia. Lo que inducía a pensar que serían las regiones cromosómicas ricas en AT las que aparecerían como bandas *Q* más brillantes. Y aunque esto ocurra con el ADN en solución, no quiere decir que la situación sea idéntica en el cromosoma. Prueba de ello nos la ofrece el ratón de laboratorio (*Mus musculus*) y una especie afín (*Mus cervicolor*): en aquél aparecen las regiones centroméricas con una fluorescencia más apagada que el resto del cromosoma, a pesar de contener ADN satélite rico en AT, en tanto que en el segundo la fluorescencia centromérica es especialmente fuerte, a pesar de que el ADN satélite allí localizado es más pobre en AT. No obstante estas aparentes contradicciones, una prueba en favor de la afinidad existente entre la quinacrina y las regiones cromosómicas ricas en AT la constituye el hecho de que cuando se añaden a los cromosomas anticuerpos anti-adenina conjugados con fluorocromos, el patrón de bandas que se obtiene es similar al observado al usar quinacrina. Si esta fluorescencia diferencial es realmente un índice de la reacción anti-adenina, la similitud observada entre los patrones de bandeo *Q* y bandeo anti-A constituiría un fuerte apoyo en favor de la hipótesis de que la quinacrina prefiere las regiones cromosómicas ricas en AT.

En la misma simplicidad de las técnicas de bandeo *Q* reside la dificultad de estudiar su fundamento. Si bien parece claro que la quinacrina se une al ADN y no a las proteínas del cromosoma, el modo en que esta unión tiene lugar no ha sido suficientemente aclarado hasta la fecha; no se sabe si existen diferencias de cantidad de quinacrina asociada a lo largo del cromosoma, siendo resultado de ello el bandeo *Q*, o si ocurre una excitación diferente de la fluorescencia en las regiones bandeadas, aunque la cantidad de quinacrina se distribuya uniformemente a lo largo del cromosoma. Hoy día se acepta que el bandeo *Q* sea consecuencia de algún tipo de efecto de las proteínas cromosómicas sobre la interacción quinacrina-ADN, pero se desconoce el mecanismo exacto.

Aunque los patrones de bandas *Q* y bandas *G* son muy similares en la mayoría de los mamíferos, se considera que el bandeo *G* responde a un fenómeno diferente. Al ponerse a punto las técnicas de bandeo *G*, una de las cuestiones a dilucidar era resolver si los propios tratamientos efectuados inducían las bandas *G* o si favorecían la detección de algo ya existente. Al observarse que dichas bandas podían producirse ocasionalmente sin tratar los cromosomas o con tratamientos muy suaves, fue quedando claro que las bandas existían realmente en los cromosomas. Hipótesis que terminó por confirmarse al constatarse que los patrones de bandeo *G* se correspondían exactamente con el patrón de cromómeros (zonas condensadas) que se observaba en los cromosomas meióticos de la misma especie sin someterlos a ningún procedimiento de bandeo. Según esto, el bandeo *G* resaltaría el patrón básico de cromómeros existentes en los cromosomas somáticos.

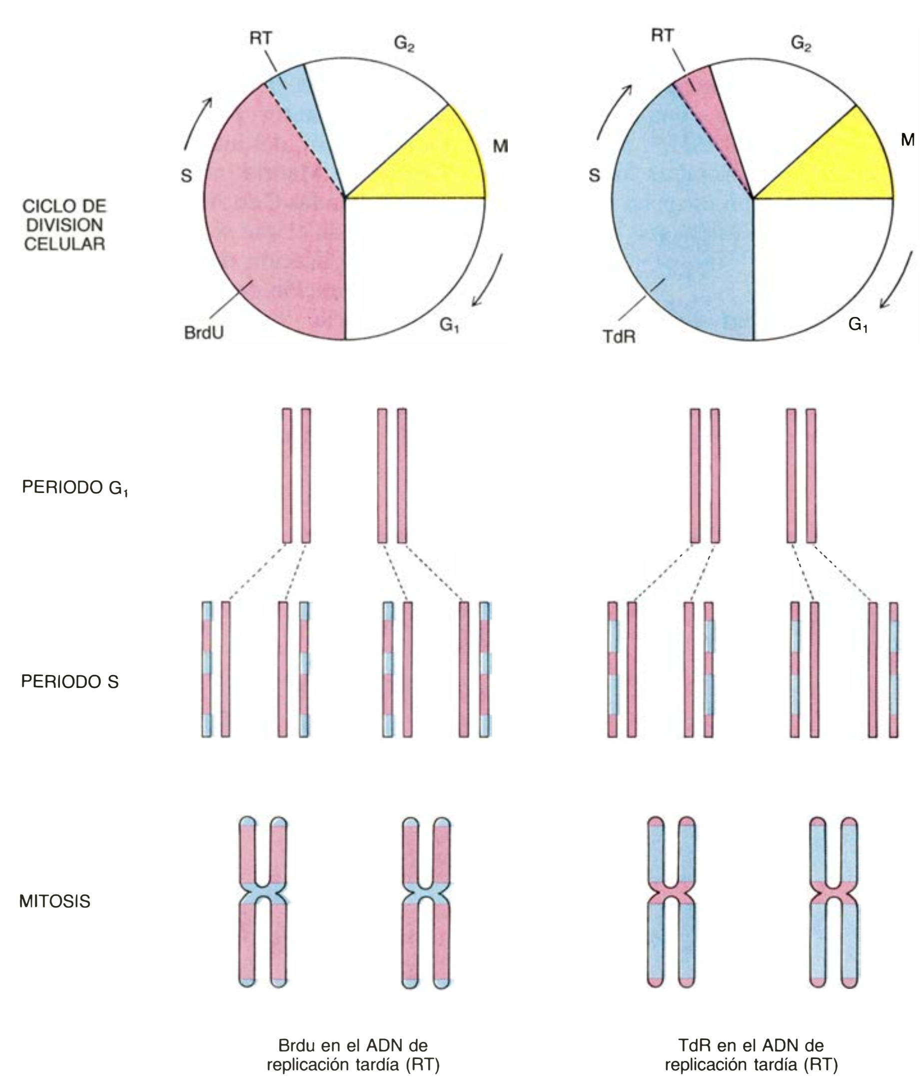
Todos los procedimientos de bandeo *G* implican una pérdida de la estructura del cromosoma durante el pretratamiento, estructura que se reconstruiría luego al teñir allí donde aparecen las bandas. Los pretratamientos a que son sometidos los cromosomas, más que inducir en los mismos una pérdida sensible de ADN o proteínas, tendrían como resultado la destrucción de enlaces químicos fundamentales para el mantenimiento de la estructura de la cromatina. Dado que no ha podido demostrarse que el bandeo *G* se relacione con diferencias en el ADN a lo largo del cromosoma, se supone que las diferencias químicas que dan lugar a la aparición de bandas *G* se establecen en las proteínas cromosómicas; más concretamente, se relaciona dichas bandas con diferencias existentes en el estado del azufre proteico. Así, Sumner sostenía en 1974 que las bandas *G* eran bastante ricas en disulfuros proteicos (-S-S-), mientras que las bandas *G* negativas lo eran en sulfhidrilos (-SH). Más recientemente, Burkholder y Duczek, han demostrado que los procedimientos de bandeo *G* inducen cambios cuantitativos y cualitativos específicos en las proteínas cromosómicas.

El colorante de Giemsa es una mezcla formada por varios derivados de la tiazina (básicos) con la eosina (ácida). Por separado, estos colorantes no producen el bandeo *G*. Según Sumner y Evans, el color magenta típico que presentan los cromosomas teñidos con Giemsa se debe a que forman *in situ* un compuesto de dos moléculas de tiazina y una de eosina; parece ser que, para que se forme este compuesto, es necesaria la presencia de ADN. No se exige ninguna proporcionalidad entre la cantidad de ADN presente y la cantidad de compuesto formada, siendo ésta una de las razones de que no pueda explicarse el bandeo *G* en razón sólo del distinto contenido de ADN a lo largo del cromosoma. Si bien el mecanismo del bandeo *R* ha sido poco estudiado, cabe destacar las observaciones de Dutrillaux y Covic, en 1974, según los cuales se puede obtener el bandeo *R* en los mismos cromosomas en los que se detectó previamente un bandeo *G*, con sólo prolongar el tiempo de tratamiento. Esto sugeriría algún tipo de similitud en el mecanismo por el cual se producen ambas bandas. Predomina hoy la opinión de que las bandas *R* son relativamente ricas en GC, lo que influiría en el bandeo preferente de estas regiones.

Matsui y Sasaki aportaron pruebas de que las proteínas ácidas serían las principales responsables del bandeo *N*. Basaban su hipótesis en que la técnica empleada se había diseñado para extraer ácidos nucleicos e histonas de las preparaciones histológicas, así como en el hecho de que, luego de tratar con enzimas proteolíticas (pronasa o tripsina), no se obtenía el bandeo *N*. Este era sensible, además, al tratamiento con álcalis (reaccionarían con las proteínas ácidas), pero no al tratamiento con ácidos. Apoyándose en que estas técnicas ponen de manifiesto los organizadores nucleolares activos, se piensa que las proteínas ácidas podrían estar implicadas en la expresión de los cistrones ribosomales. Todos los estudios llevados a cabo han indicado que una proteína o proteínas son las responsables de la reducción de los iones Ag^+ a plata metálica (Ag^0) que tiene lugar al llevar a cabo los métodos Ag-NOR.

Vayamos con el bandeo *C*. Tuvo su origen en técnicas empleadas para hibridar *in situ* ácidos nucleicos (mediante desnaturalización del ADN cromosómico y posterior restablecimiento con ARN complementario del ADN repetitivo). Se pensó que las bandas *C* debían resultar de una desnaturalización y restablecimiento diferencial del ADN a lo largo del cromosoma. Existiría, en consecuencia, una correlación entre ADN repetitivo y heterocromatina constitutiva. De hecho, los resultados de los experimentos llevados a cabo con el fluorocromo naranja de acridina apuntan en este sentido. Cuando se someten las células de ratón a tratamientos que desnaturalizan el ADN, los cromosomas presentan una fluorescencia roja (propia del ADN de cadena simple), a excepción de las regiones centroméricas (bandas *C*), que adquieren rápidamente una fluorescencia verde (peculiar del ADN de doble hélice). Esto sugiere que el ADN localizado en estas regiones (secuencias muy repetidas) se restablece con gran rapidez, recuperando su estructura de doble hélice antes que el resto del ADN del cromosoma. Similares resultados se han conseguido mediante experimentos de desnaturalización-restauración en humanos, usando anticuerpos marcados con fluoresceína específicos para el ADN de cadena simple: las regiones correspondientes a bandas *C* no mostraban fluorescencia (habían restablecido rápidamente su ADN), a diferencia del resto del cromosoma.

No bastan esos datos para constituir una prueba directa de que el bandeo *C* resulte, exclusivamente, de la desnaturalización o no del ADN. Y ello por una razón capital: se desconoce qué tiñe realmente el Giemsa (¿ADN? ¿proteínas? ¿otros componentes del cromosoma?). Varios investigadores han encontrado que el tratamiento con $Ba(OH)_2$ o NaOH seguido de la incubación en solución salina citrato comporta una considerable pérdida de



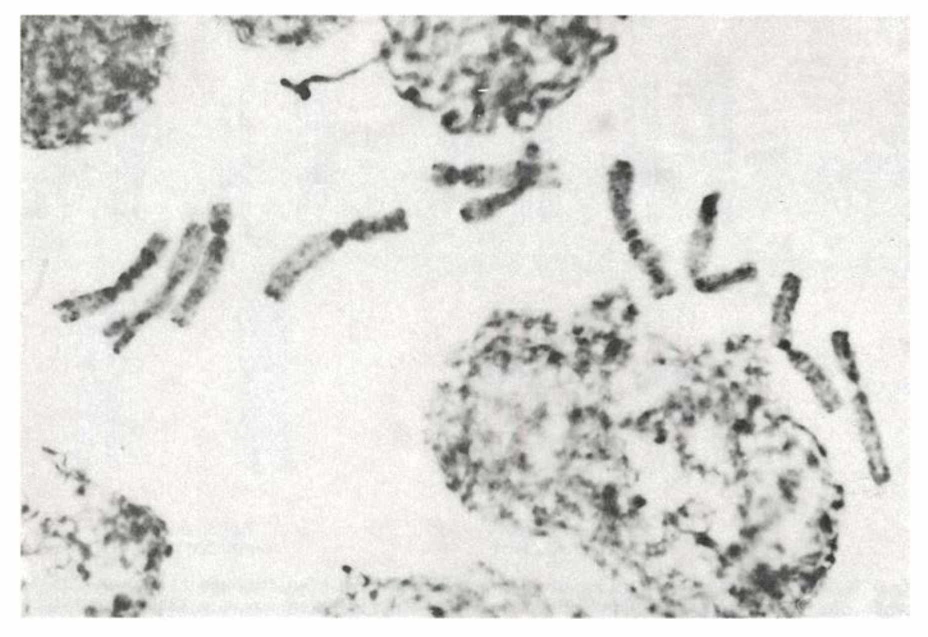
7. DOS METODOS seguidos para localizar, en la cebolla (*Allium cepa*), las regiones ricas en ADN de replicación tardía (replicado al final del período S) a lo largo de los cromosomas. El primero de ellos (*izquierda*) consiste en que las células incorporen 5-bromodesoxiuridina (BrdU) en dicho ADN, mientras que el otro método consiste en la incorporación de timidina (TdR) en el ADN de replicación tardía después de que se haya incorporado BrdU en el ADN de replicación temprana y media. Considerando un par de cromosomas homólogos, en línea continua se representan las cadenas de ADN parentales, y, en línea discontinua, las de nueva síntesis. Dado que las regiones cromosómicas en las que se incorpora BrdU se tiñen luego menos intensamente, los patrones obtenidos en ambos casos son inversos, localizándose el ADN de replicación tardía en las regiones teloméricas y pericentroméricas de los cromosomas.

ADN por parte de las células fijadas, por lo que han atribuido la tinción preferencial de la heterocromatina en las bandas *C* a su rápida restauración, que evitaría su extracción posterior durante el tratamiento. Por otro lado, se ha demostrado también que se extraen proteínas nucleares y que se inducen cambios sustanciales en las mismas, siendo en este sentido más eficaz el tratamiento con $Ba(OH)_2$.

Se admite que la interacción ADN-proteínas desempeña un papel destacado en el mecanismo del bandeo *C*, pues la retención de una mayor cantidad de ADN en las bandas *C* parece deberse a dicha interacción más que a la restauración rápida del ADN. Esto viene avalado por la observación de Alfi y colaboradores, en 1973, de que dicho bandeo podía conseguirse por medio de una digestión enzimática suave con desoxirribonucleasa, sin desnaturalizar el ADN. Lo que significa que, en las bandas, se conserva más ADN que en el resto del cromosoma, retención que es muy probable que se deba a una interacción específica entre el ADN, las bandas y proteínas cromosómicas localizadas en esas regiones, en estrecha relación con la alta condensación que existe en las mismas.

El ADN de las regiones cromosómicas heterocromáticas suele replicarse al final del período *S* de la interfase. En humanos, el cromosoma *X* heterocromático de la hembra empieza y termina su replicación después que su homólogo. Por otro lado, diversos resultados experimentales indican que en otros mamíferos también las bandas *C* y las *Q* o *G* se replican tardíamente y son ricas en AT, mientras que las *R* son de replicación temprana y ricas en GC. Concretamente, el autor y J. Cano, de la Facultad de Ciencias de Málaga, han podido comprobar que el patrón de replicación tardía que se obtiene mediante la incorporación de BrdU en la rata coincide en gran medida con el patrón de bandas *G*. Asimismo, se ha observado que la heterocromatina es normalmente inactiva en la transcripción (expresión de los genes allí contenidos).

Sin embargo, esto no es siempre así; no toda la heterocromatina replica tardíamente y existen regiones cromosómicas que replican su ADN al final del período *S* y no son heterocromáticas. Además, regiones cromosómicas no heterocromáticas pueden mostrarse genéticamente inactivas en determinadas circunstancias. Los resultados obtenidos por el autor y por López-Saez y González-Gil, del Instituto de Biología Celular de Madrid, al comparar el patrón de bandas *C* en *Allium cepa* y otras liliáceas con el que se consigue al estudiar la replicación del ADN mediante la incorporación de BrdU, revelan una discrepancia entre heterocromatina constitutiva y replicación tardía del ADN; existen, pues, regiones cromosómicas en estas plantas que son ricas en ADN de replicación tardía y que, sin embargo, no aparecen como bandas *C*. Parece claro que el mero hecho de que una región cromosómica replique su ADN tardíamente no es razón suficiente para definirla como heterocromática.



8. CROMOSOMAS METAFASICOS de cebolla (*Allium cepa*) en los que pueden observarse intensamente teñidas las regiones ricas en ácidos desoxirribonucleico de replicación tardía. Se suministra a las células 5-bromodesoxiuridina para que la incorporen en su ADN de replicación temprana y media, y a continuación timidina, que se incorpora en el ADN de replicación tardía. Una vez fijadas las células, se someten a una serie de tratamientos degeneradores que dan como resultado la degradación preferencial de las regiones cromosómicas bromosustituidas, las cuales habrán de aparecer, luego, más débilmente teñidas.

En cuando a la no expresión génica de la heterocromatina, hay que tener en cuenta que las bandas *N* están asociadas con los organizadores nucleolares, regiones en las que se lleva a cabo una intensa transcripción de ARN ribosómico, aunque la verdad es que no se ha resuelto todavía si las bandas *N* representan a los propios organizadores nucleolares o si lo que se bandea es una región adyacente del cromosoma.

Las técnicas de bandeo han tenido su aplicación más importante en la identificación de los pares cromosómicos para la construcción de cariotipos, pero no ha sido la única. Hoy se pretende establecer el patrón de bandas de cromosomas prometafásicos del hombre; se multiplica así el número de bandas que pueden visualizarse. Si en cromosomas metafásicos se aprecian unas 350 bandas, son del orden de 2000-3000 bandas o cromómeros las que se obtienen en prometafase, dado el menor grado de condensación cromosómica en esta etapa.

Los patrones de bandeo han sido decisivos para que los citogenetistas puedan descifrar con exactitud situaciones aneuploides en el cariotipo (variaciones numéricas que sólo afectan a determinados cromosomas de la dotación), como trisomías y monosomías, así como el origen de reordenaciones tales como translocaciones, deleciones, inversiones o duplicaciones observadas en los cromosomas. Un ejemplo concreto lo tenemos en el caso del cromosoma extra llamado Filadelfia, que se observa en pacientes con leucemia mieloide crónica. Antes de que se pudiese contar con las técnicas de bandeo, se atribuía a una deleción (pérdida del material cromosómico) procedente del cromosoma 21. Merced a los bandeos *Q* y *C* se descubrió que se trataba de una deleción, en efecto, pero no procedente del cromosoma 21, sino del 22, y que además dicho fragmento cromosómico perdido se añadía en muchos casos al extremo del brazo largo del cromosoma 9 por translocación.

Otra importante aplicación de las técnicas de bandeo ha sido para identificar los cromosomas portadores de grupos de ligamiento (grupos de genes que se heredan juntos). En el caso concreto del ratón se había demostrado por medio de estudios genéticos clásicos la existencia de 19 grupos de ligamiento, pero sólo después de contar

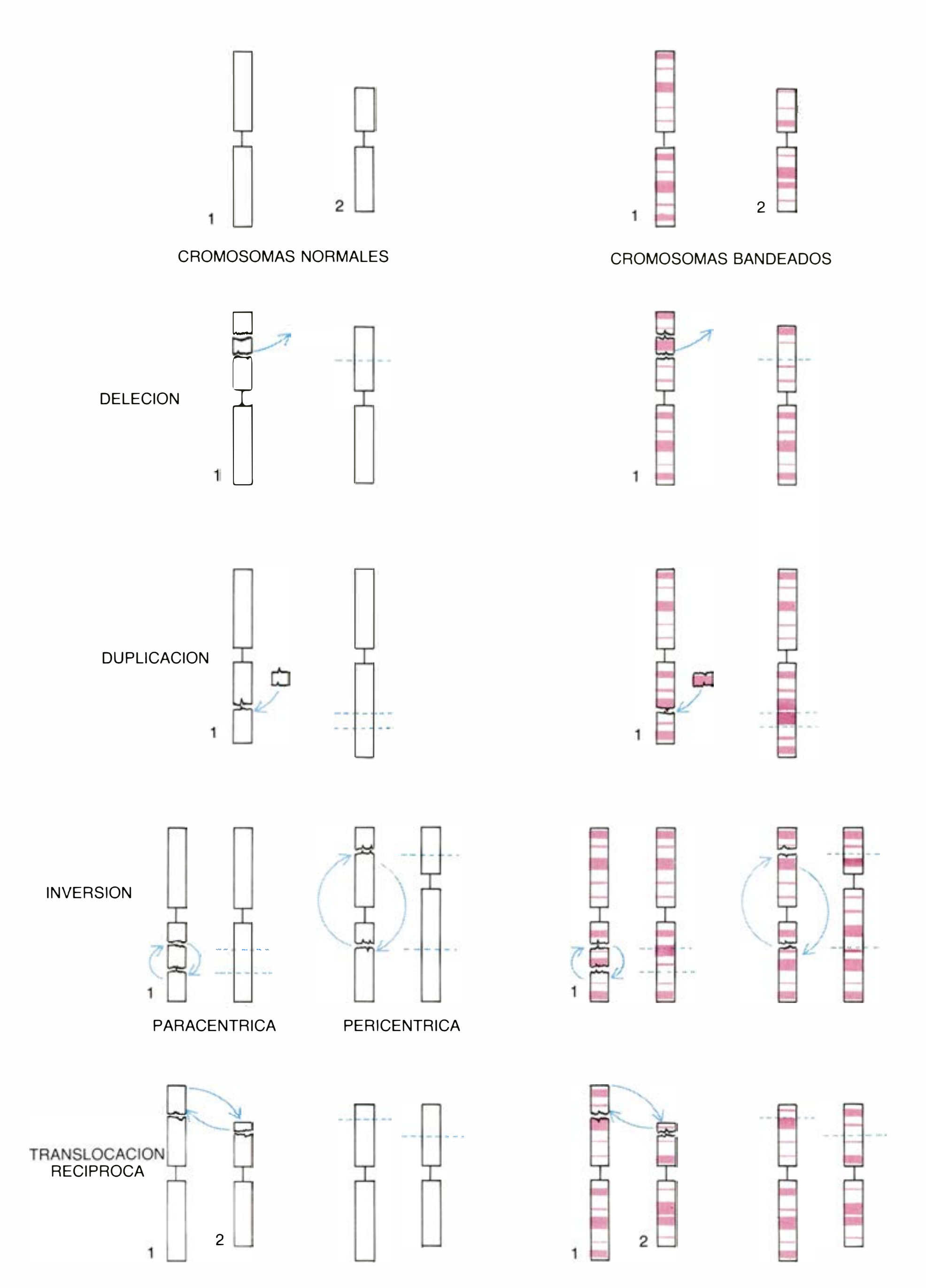
con el bandeo ha sido posible asignar esos grupos de ligamiento a cromosomas específicos, al estudiar las translocaciones observadas.

Ya vimos, al considerar el bandeo *Q*, que algunos cromosomas podían identificarse en los núcleos interfásicos, como es el caso del cromosoma *Y* humano. Esto ayuda a conocer el sexo de los individuos sin tener que recurrir al cultivo de linfocitos, técnica habitual para la obtención de cariotipos humanos: basta observar en el microscopio de fluorescencia células no proliferantes (de mucosa bucal, por ejemplo), luego de teñir con quinacrina. Del mismo modo, puede identificarse el cromosoma *Y* en espermatozoides humanos y estudiar la segregación de este cromosoma durante la espermatogénesis. También, mediante el bandeo *C*, pueden identificarse los cromosomas 1 y 9 en núcleos interfásicos y espermatozoides humanos, porque presentan bandas *C* muy desarrolladas.

Un hecho bastante frecuente es la existencia, en muchas especies, de diferencias heredables entre cromosomas homólogos. Este llamado polimorfismo o heteromorfismo cromosómico se ha puesto de manifiesto a través de las diferencias morfológicas, pero también se ha podido observar en el patrón de bandas, sobre todo en lo que se refiere a las bandas *C* y *Q*, en animales y en plantas. Las diferencias en el bandeo *Q* entre los homólogos, cuando existen, se reflejan en la intensidad de fluorescencia; con el bandeo *C* polimórfico, las diferencias se reflejan en la mayor o menor porción del cromosoma bandeada. Si bien la existencia de estos polimorfismos es de gran utilidad para los estudios de genética de poblaciones, no se sabe aún el efecto que los mismos puede representar para los individuos portadores, aunque se ha observado, por ejemplo, la superioridad adaptativa de los heterocigotos para algunos polimorfismos. En determinados casos, el estudio del heteromorfismo cromosómico resulta también muy útil, como ocurre con la trisomía 21 (síndrome de Down), ya que mediante el bandeo *Q* puede llegar a reconocerse en qué progenitor ocurrió la no-disyunción causante de la aneuploidía del hijo.

El reconocimiento individual de los cromosomas de cualquier especie mediante el bandeo constituye una poderosa herramienta de trabajo para los estudios evolutivos; permite comparar entre sí los cromosomas de diferentes especies relacionadas taxonómicamente. Tal vez el caso más sorprendente lo constituye la comparación entre el cariotipo bandeado del hombre y el del chimpancé, tras la cual se llegó a la conclusión de que, en el nivel cromosómico, la divergencia evolutiva entre estas dos familias podía deberse simplemente a la ocurrencia, en los cromosomas, de un grupo de fusiones robertsonianas y a unas pocas inversiones. Las fusiones robertsonianas o fusiones céntricas se producen en el curso de la evolución, de modo que un cromosoma de una especie puede proceder de la fusión, de centrómeros, de dos cromosomas de otra, en tanto que las inversiones se producen en los cromosomas por una reversión de la secuencia génica.

En resumen, aunque la naturaleza intrínseca de las bandas aún no se conoce con exactitud, el advenimiento de las técnicas de bandeo cromosómico ha sido de la máxima importancia para el avance de la citogenética, en lo que tiene esta de ciencia básica y en las aplicaciones de la misma en el diagnóstico y consejo genético ante ciertas enfermedades congénitas.



9. REPRESENTACION ESQUEMATICA de algunos cambios estructurales producidos como consecuencia de roturas en los cromosomas y posterior reunión de los segmentos implicados. Dichas roturas pueden ocurrir de modo espontáneo, aunque con una frecuencia muy baja. Lo normal es que las induzcan distintos agentes físicos o químicos (agentes clastogénicos). Puede apreciarse la utilidad de las técnicas de bandeo cromosómico para determinar con exactitud los cromosomas afectados, así como los segmentos involucrados (*doble columna de color de la derecha*). Un ejemplo especialmente significativo lo constituyen las llamadas inversiones paracéntricas (*penúltimo esquema*). Al afectar a un solo brazo y no producir, en consecuencia, cambio morfológico en el cromosoma, no serían detectables en cromosomas no bandeados.

Objeto superluminoso en la Gran Nube de Magallanes

Una nebulosa gigante de esta pequeña galaxia, próxima a la nuestra, aloja un objeto cuyo brillo supera, en 50 millones de veces, el del Sol. Si nos halláramos ante un solo cuerpo, su masa no tendría parangón

John S. Mathis, Blair D. Savage y Joseph P. Cassinelli

La masa del Sol (2×10^{33} gramos) sirve de unidad de medida para la masa de otros objetos celestes. Hasta hace poco, los astrónomos aceptaban generalmente que no podían formarse estrellas cuya masa centuplicara la solar. Opinión que acaban de poner en duda las observaciones obtenidas de un objeto superluminoso y, posiblemente, de masa enorme de una pequeña galaxia próxima a la nuestra: la Gran Nube de Magallanes. El objeto se denomina R136. Está en la nebulosa de la Tarántula, conocida también por nebulosa Dorado 30, ya que se encuentra en la constelación austral Dorado. Si R136 es una estrella única, podría tener una masa de hasta mil veces la solar.

Las nebulosas gaseosas resplandecientes figuran entre los objetos más bellos e impresionantes del universo. De entre la treintena de galaxias del grupo local que incluye la nuestra, la nebulosa Dorado 30 destaca por su brillo y volumen. Su forma es irregular y su tamaño, extraordinario. Mientras que, a simple vista, la Gran Nebulosa de Orión parece una estrella difusa, Dorado 30 cubre una superficie de cielo comparable con la ocupada por el Sol o la Luna, a pesar de hallarse más de 100 veces más lejos que la nebulosa de Orión. Posee un diámetro de unos mil años-luz; tres, en cambio, mide el de Orión. Su gas está altamente ionizado: la mayoría de sus átomos han perdido uno o varios electrones. Contiene 1500 veces más gas ionizado que la nebulosa de Orión. La ionización debe ser el resultado de la radiación ultravioleta emitida por las estrellas jóvenes, calientes y de gran masa inmersas en la nebulosa.

R136 es el objeto más brillante de cuantos componen Dorado 30. (La designación proviene de un catálogo de las estrellas más brillantes de la Gran Nube de Magallanes, preparado por Michael Feast, A. D. Thackeray y A. J. Wesselink, del Observatorio sudafricano de Radcliffe.) Se aloja casi en el centro de la nebulosa, rodeado de docenas de estrellas más débiles, cada una de las cuales merecería el apelativo de brillante. El objeto central radia aproximadamente un millón de veces más luz que el Sol a las longitudes de onda visibles, a las que hay que sumar otras 50 si contamos las longitudes de onda del ultravioleta. Esta gran luminosidad explica una ionización mayor que cualquier otro objeto de la nebulosa.

En 1980, J. V. Feitzinger, Wolfhard Schlosser, Theodor Schmidt-Kaler y Christian Winkler, de la Universidad del Ruhr, obtuvieron excelentes fotografías de R136 con el telescopio de 3,6 metros del Observatorio Meridional Europeo en Chile. Descubrieron que constaba de tres porciones distintas, dispuestas en forma de coma. A la componente más brillante se le dio el nombre de R136a. R136b y R136c son más débiles, más rojizas y probablemente más frías. Los investigadores alemanes llegaron a la conclusión de que R136a podría ser una estrella de masa considerablemente mayor que el límite superior de masas estelares comúnmente aceptado.

Los primeros espectros en luz visible de R136, obtenidos en 1950 por Feast en el Observatorio de Radcliffe, indicaban que el objeto tenía un espectro peculiar, característico de estrellas extremadamente calientes. Ulteriores trabajos de Nolan R. Walborn, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial, Peter S. Conti, de la Universidad de Colorado en Boulder, y Dennis Ebbets, del Instituto del Telescopio Espacial, confirmaron aquel descubrimiento.

Las estrellas con una temperatura en superficie por encima de los 30.000 grados Kelvin emiten la mayor parte de su radiación en las regiones de corta longitud de onda del ultravioleta; éstas no pueden atravesar la atmósfera terrestre. Por tanto, las observaciones ultravioletas de R136a resultaban imprescindibles para conocer el objeto; pero hubo que esperar a los avances técnicos aportados por la era espacial. Uno de esos progresos lo constituyó el satélite Explorador Ultravioleta Internacional (IUE), observatorio espacial explotado conjuntamente por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Consejo de Investigación Científica del Reino Unido. Con este satélite se obtuvieron espectros ultravioleta de R136a en 1978.

El satélite reveló un espectro parecido, en muchos aspectos, al de las estrellas normales más calientes conocidas, del tipo O3. (La *O* designa la clase espectral más caliente. El número menor adjunto indica la estrella más caliente de una clase. No se han definido estrellas O1 u O2.) Walborn identificó las estrellas O3 como un tipo definido. Tienen una temperatura en superficie de unos 50.000 grados Kelvin y se encuentran entre las estrellas más luminosas conocidas.

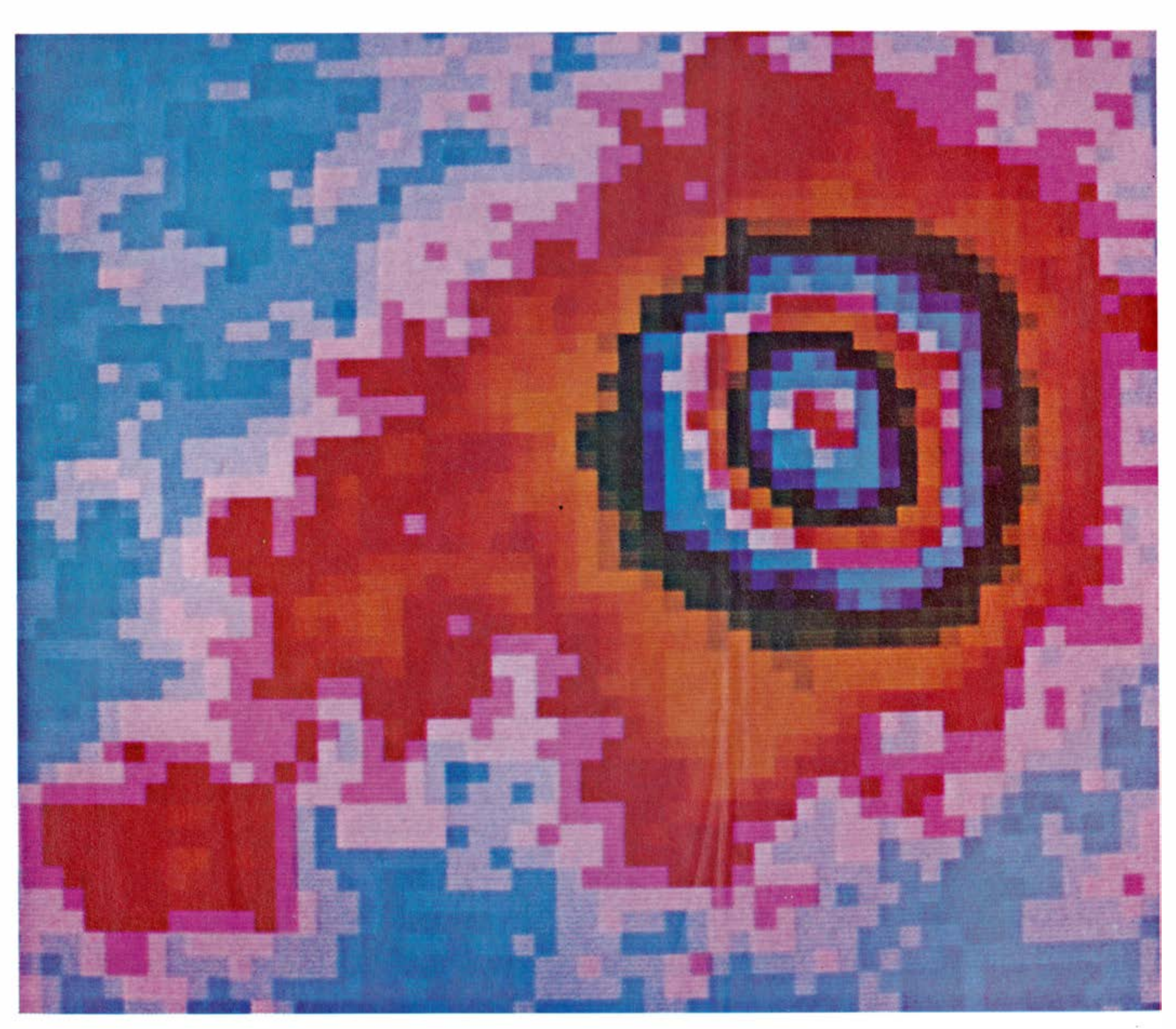
El espectro ultravioleta de R136a muestra lo que llamamos líneas P del Cisne, por una estrella altamente luminosa de la constelación del Cisne. En las longitudes de onda del ultravioleta, tales líneas suelen originarse con átomos de carbono, oxígeno y nitrógeno altamente ionizados: C IV, O IV, O V, N IV y N V. (Los números romanos recogen el número de electrones arrancados más uno: así, por ejemplo, C IV es carbono con tres electrones arrancados). Las líneas P del Cisne dibujan un perfil especial: se asemejan a una línea de absorción en la región de longitudes de onda cortas respecto a la longitud de

onda en reposo, y a líneas de emisión en la región de longitudes de onda más larga. La longitud de onda en reposo es la que emitiría un objeto que se encontrase en reposo respecto al observador; las líneas P del Cisne implican, pues, que el objeto pierde masa en forma de una envoltura de gas que se está expulsando a modo de viento estelar. El gas situado en la parte del objeto alejada del observador se está distanciando de aquel, por cuya razón las longitudes de sus emisiones se corren hacia ondas más largas; el gas en la parte del objeto próxima se está moviendo hacia el observador, de tal manera que sus longitudes de onda de absorción se corren hacia valores más bajos.

La velocidad de salida de la materia desde R136a se puede estimar a partir del perfil de sus líneas P del Cisne. En particular, las longitudes de onda de absorción en la región de longitudes de onda más cortas de la línea C IV se extienden 18 unidades angstrom desde la longitud de onda en reposo de la línea. Esto indica que la materia se está alejando de R136a a una velocidad de 3500 kilómetros por segundo. El viento estelar de R136 se calificaría mejor como huracán; para una estrella caliente normal, la velocidad media del viento es de unos 2000 kilómetros por segundo. Sólo los objetos del tipo O3 muestran las grandes velocidades del viento de R136a.

Del alto estado de ionización de la materia de su atmósfera, inferimos la elevada temperatura superficial de R136a. A medida que aumenta la temperatura de una estrella, sus capas exteriores se ionizan cada vez más, por una doble razón: crece el número de fotones de alta energía en su radiación y adquieren mayor violencia las colisiones entre partículas. Así, la presencia de algunos iones y la ausencia de otros en el espectro de una estrella permiten diagnosticar su temperatura. Para R136a, la presencia de líneas que representan C IV, O V y N V y la ausencia de líneas del Si IV (silicio triplemente ionizado) indican una temperatura en superficie que se mueve en el intervalo entre 45.000 y 80.000 grados Kelvin. En una atmósfera más fría, habría líneas de Si III y Si IV conspicuas.

El espectro ultravioleta de R136a se parece al de las estrellas O3, salvo en la línea de emisión del helio simplemente ionizado (He II), cerca de la longitud de onda de 1640 angstrom, que es ex-

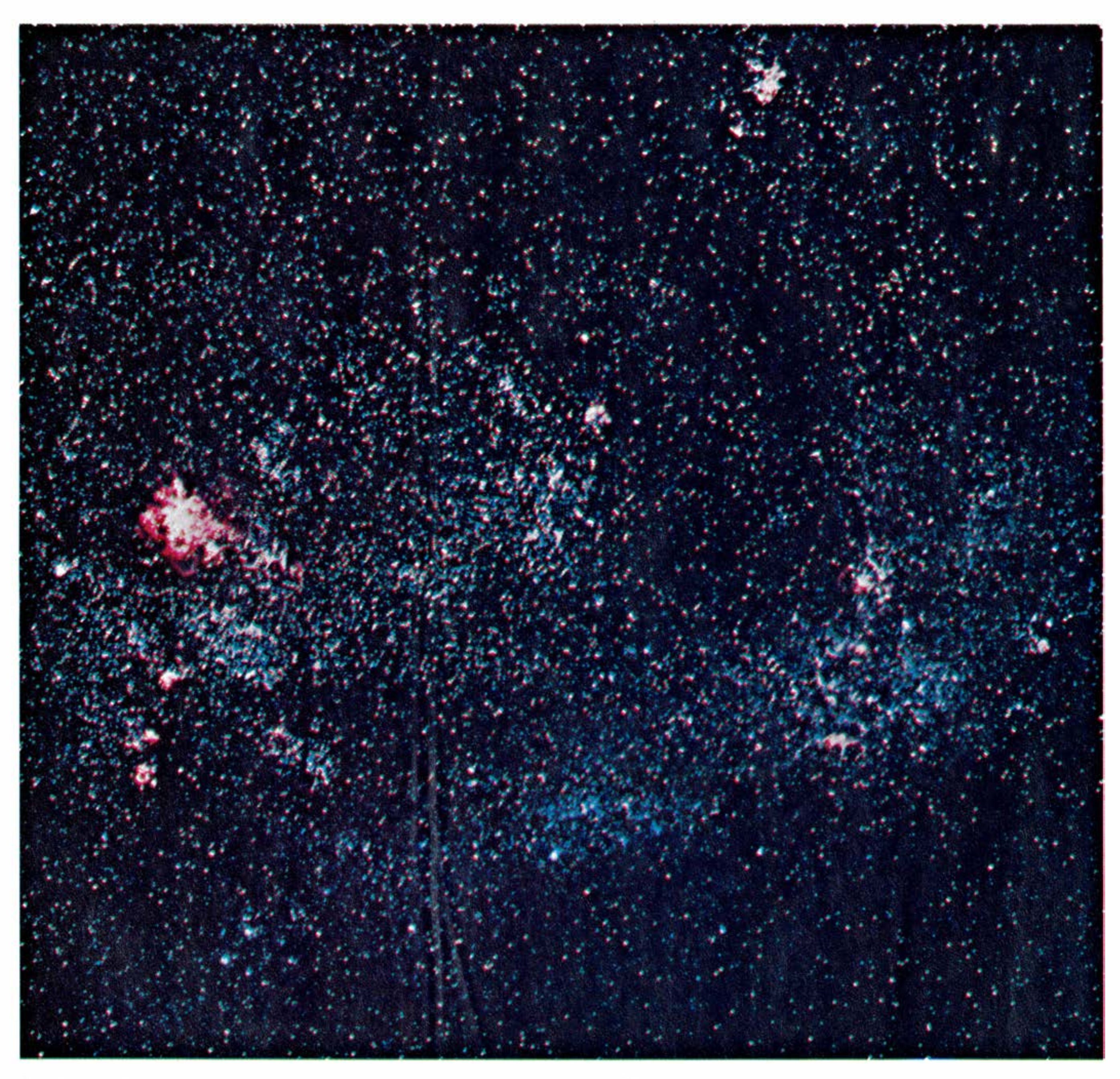


1. ZONA CIRCUNDANTE DEL OBJETO R136, en una fotografía tratada por ordenador y tomada con luz visible. La zona está cerca del centro de la nebulosa de la Tarántula (conocida también por Dorado 30, ya que se encuentra en la constelación meridional de ese nombre). El R136 tiene tres componentes, al menos. La más brillante de ellas es la zona irregular y de predominio azul en la parte central derecha; se la ha designado R136a. A su izquierda se encuentra R136b, que tiene un brillo aproximado del 20 por ciento del que despide R136a. La zona rojiza de la parte inferior corresponde a R136c.

cepcionalmente intensa y ancha. Aunque algunas estrellas O3 muestran emisión He II, ninguna presenta una línea tan intensa y ancha como la de R136a. Importa destacar que los peculiares objetos conocidos por estrellas de Wolf-Rayet muestran líneas de emisión He II de excepcional intensidad a causa de su enorme viento estelar. Se cree que esas calientes estrellas se hallan en una fase de evolución más avanzada que la de las estrellas O normales. La semejanza del espectro de R136a con los espectros de las estrellas O3 de Wolf-Rayet sugiere que podrían venir incluso producidas por un conjunto de estrellas de ambos tipos.

La naturaleza extrema de R136a se hace evidente cuando se considera el número de estrellas "normales" que se necesitarían para reproducir su espectro. Por ejemplo, R122 es la estrella normal más luminosa de la Gran Nube de Magallanes, triplicando la luminosidad de la estrella que le sigue en esa galaxia. Brilla tres millones de veces más que el Sol; la mayoría de las restantes estrellas supergigantes son solamente 500.000 veces más luminosas. R122 tiene un espectro O3 parecido, en líneas generales, al de R136, pero con una emisión He II más débil. Para obtener el espectro de R136a a partir de un grupo de estrellas normales se requerirían unas 13 estrellas como R122 o unas cuarenta estrellas O3 menos luminosas, amén de otras 20 estrellas de Wolf-Rayet de brillo normal. Las estrellas O3 llaman la atención por su escasez; se conocen cuatro en toda la Gran Nube de Magallanes y 10 en la nuestra. Objetos que deberían estar amontonados, todos, en un volumen de un año-luz, o menos, de diámetro.

En términos de evolución estelar, no



2. GRAN NUBE DE MAGALLANES, fotografiada con el telescopio Schmidt de 61 centímetros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile, con cuyo permiso la publicamos. Visible solamente desde el hemisferio Sur, constituye la galaxia más cercana a la nuestra. La nebulosa Dorado 30 es la región rosada de la parte central izquierda. La nebulosa aloja muchas estrellas de gran masa suficientemente calientes para ionizar el gas interestelar; radian la mayor parte de su energía a longitudes de onda cortas y aparecen azules en la fotografía. Las manchas rojas son de gas ionizado que emiten la línea Balmer roja del hidrógeno en la región visible del espectro. La nebulosa Dorado 30 es el mayor de tales objetos del grupo local de galaxias, considerado en su totalidad. De un diámetro de unos 1000 años-luz, ocupa una región del firmamento comparable a una tercera parte de la que cubre el Sol.

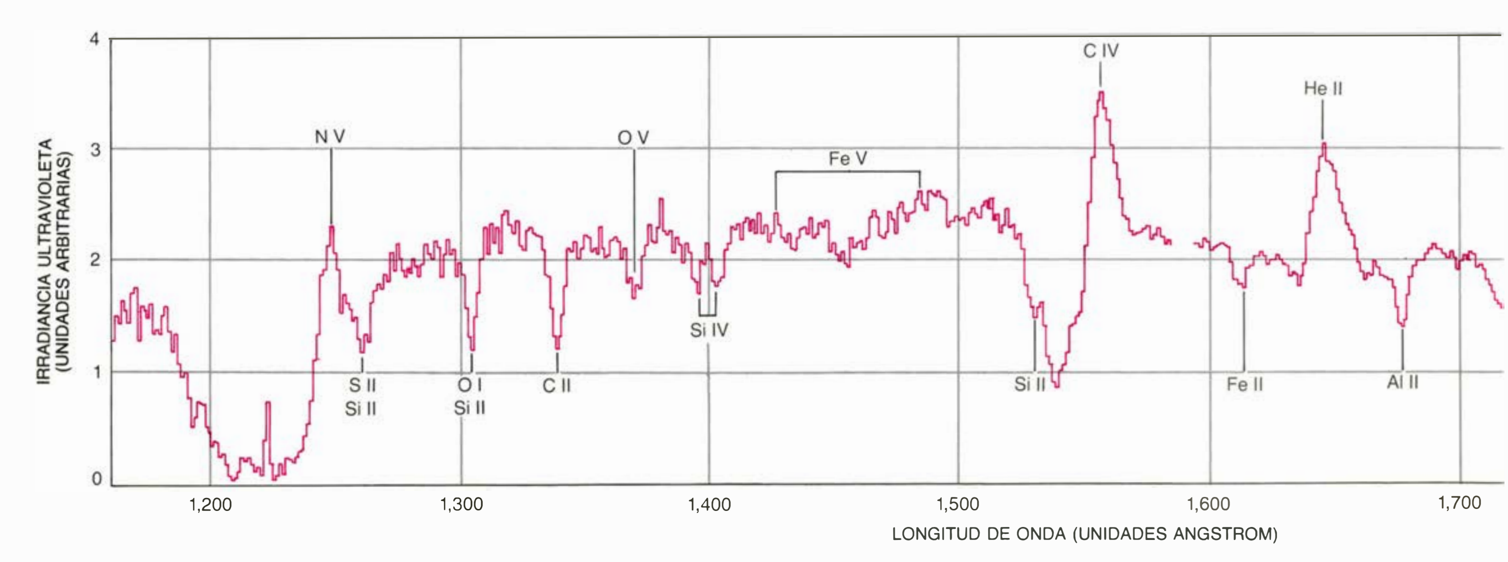
resulta descabellado suponer que se podría identificar una mezcla de estrellas O3 y Wolf-Rayet; de hecho, existe tal combinación en la nebulosa gigante de nuestra propia galaxia, la llamada Nebulosa Carina. Sin embargo, las cuatro estrellas O3 de dicha nebulosa se extienden en el espacio a lo largo de una distancia de 10 años-luz.

Se podría tratar de determinar la naturaleza de R136a estudiando la estructura de la región R136 en fotografías tomadas con telescopios con base en tierra. La principal dificultad de este enfoque reside en la desfiguración de la imagen que produce la atmósfera terrestre. Pese a ello, en una temporada de excelente visibilidad, el pasado año, Y. H. Chu, de la Universidad de Wisconsin en Madison, obtuvo fotografías de la región interna de Dorado 30 para discernir los tipos y número de estrellas próximas a R136.

Muchas estrellas calientes se encuentran a varios minutos de arco de R136. Jorge Melnick, de la Universidad de Chile, ha identificado varias de ellas como estrellas de tipo O3. A Chu debemos un análisis cuidadoso de muchas imágenes de la región R136; ha llegado a la conclusión de que, dentro de la componente R136a, que tiene un diámetro de sólo tres segundos de arco, es posible identificar, al menos, cuatro objetos estelares. Desgraciadamente, los instrumentos instalados a bordo del Explorador Ultravioleta Internacional pueden resolver estrellas individuales sólo cuando están separadas por, al menos, tres segundos de arco; supone ello que los espectros del satélite recogen contribuciones de todas las fuentes de radiación ultravioleta en la región R136a. Chu ha designado la fuente do-

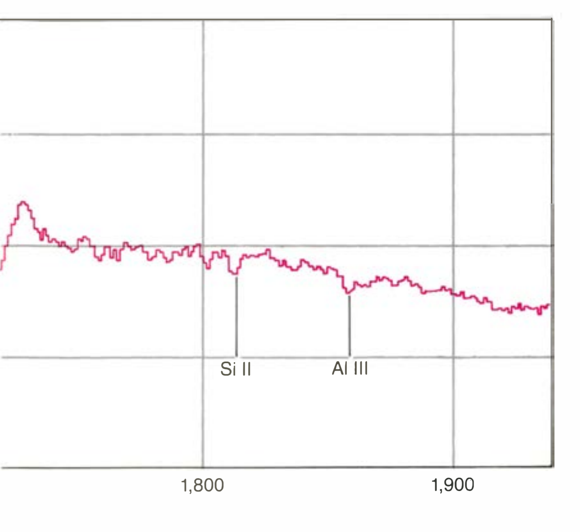


3. VISTA CERCANA de la región interna de Dorado 30, obtenida por John Wood con el telescopio de cuatro metros en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo. R136 es el apretado nudo de estrellas del centro de la fotografía. Aunque alumbra unos 50 millones de veces más que el Sol, queda atenuado por el polvo interestelar. La radiación ultravioleta de R136 ioniza gran parte del gas de la nebulosa. R136a y otras estrellas próximas emiten potentes vientos estelares que, presumiblemente, han empujado el gas formando la estructura, curvada en arco, que las rodea y que se aprecia bien en la fotografía. El objeto central es la estrella de mayor masa conocida o un cúmulo extremadamente denso de estrellas de gran masa. Los datos obtenidos hasta ahora a través de las observaciones desde el suelo y desde el satélite Explorador Ultravioleta Internacional no excluyen ninguna hipótesis.

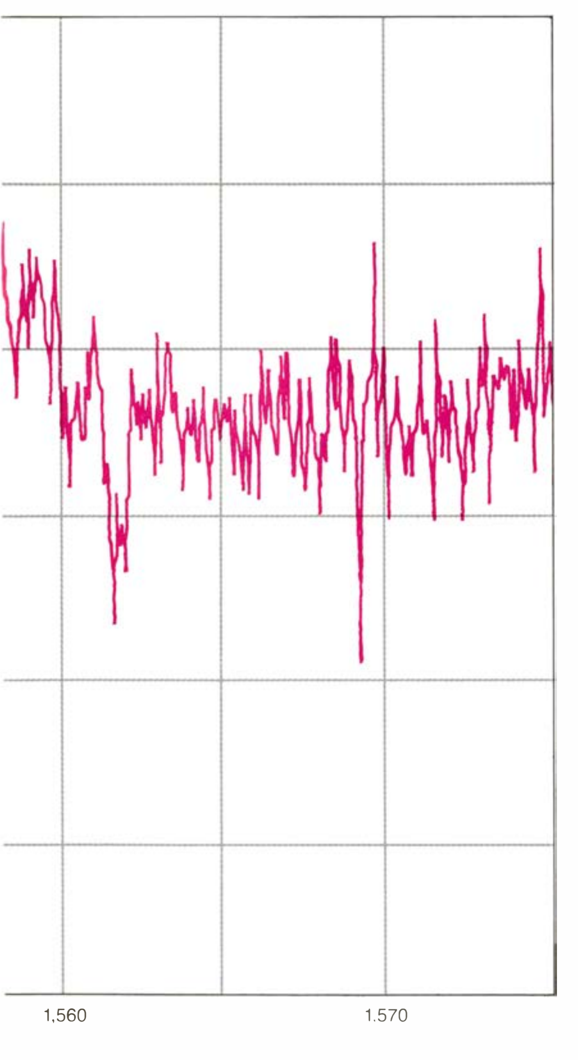


4. ESPECTRO ULTRAVIOLETA DE 136a obtenido por el satélite Explorador Ultravioleta Internacional. Nos revela cuán rara es la naturaleza del objeto. La intensidad de la radiación ultravioleta se ha representado en función de la longitud de onda. Las características notables de emisión y absorción asociadas a R136a se indican con los símbolos que se superponen al espectro; las líneas de absorción producidas por el gas estelar interpuesto se recogen debajo del espectro. Los símbolos superiores representan átomos multiplemente ionizados: nitrógeno, oxígeno, hierro, carbono y helio. Los rasgos más prominentes corresponden a C IV, He II y N IV. (Las cifras romanas son una unidad más altas que el número de electrones arrancados en la ionización.) Los espectros de esos iones dibujan un perfil característico de P del Cisne, una estrella luminosa en la constelación del Cisne: la absorción está corrida hacia

5. UNA RESOLUCION MAS ALTA del espectro de R136 a se obtuvo con el espectrógrafo de alta resolución del Explorador Ultravioleta Internacional. El espectro resuelve longitudes de onda hasta 0,1 unidades angstrom, resolución unas 70 veces mayor que la del espectro de la ilustración precedente. Aquí, el centro está en una línea del espectro de C IV, carbono triplemente ionizado. Se indican varias líneas de absorción estrechas que se originan en el gas interestelar de nuestra propia galaxia (*GL*, por galaxia local) y de la Gran Nube de Magallanes (*GNM*). La ancha característica C IV a la derecha, que tiene su origen en R136, es una línea de absorción a longitudes de onda más cortas y de emisión a longitudes de onda más largas. La absorción a longitudes de



las longitudes de onda más cortas, y la emisión hacia las más largas. El alto grado de ionización implica una alta temperatura del objeto u objetos que generan el espectro. De los perfiles P del Cisne se infiere que R136a pierde masa en un potente viento estelar. El espectro se centra en R136a.



onda más cortas implica, en virtud del efecto Doppler, que el objeto superluminoso R136 está expulsando materia a una velocidad de 3600 kilómetros por segundo. El espectro considerado constituye un perfil del característico tipo P del Cisne.

minante como R136a1. Este objeto se considera ahora candidato a estrella superluminosa. El propio Chu ha identificado una fuente puntual más débil, R136a2, a unos 0,5 segundos de arco de a1.

Para determinar los distintos pormenores de una imagen distorsionada por la atmósfera terrestre se recurre a la interferometría de moteado. Dicha técnica consiste en hacer cientos de exposiciones muy cortas, en rápida sucesión. Cada una de éstas muestra la imagen cuando la atmósfera se halla en un estado determinado (pero desconocido). Aplicando ciertos métodos matemáticos a las imágenes individuales, el investigador extrae la verdadera estructura de la imagen con la perfección, casi, con la que podría resolverla el espejo del telescopio si éste se encontrase por encima de la atmósfera.

Gerd Weigelt, de la Universidad de Erlangen-Nuremberg, aplicó esta técnica a imágenes de R136a1 tomadas con el telescopio de 3,6 metros del Observatorio Meridional Europeo. Aproximadamente hacia la misma época, John Meaburn, de la Universidad de Manchester, y sus colegas, obtuvieron resultados algo diferentes con el telescopio anglo-australiano de 3,9 metros, en Australia. Presumiblemente, las diferencias arrancarían del distinto modo en que ambos grupos analizaron las imágenes.

Los resultados de la interferometría de moteado concuerdan en un hecho: R136a1 consta de un objeto dominante no resuelto, con varios objetos más débiles próximos a él. Meaburn cree que ningún otro objeto de la región tiene un brillo comparable, pero Weigelt sostiene que hay un segundo objeto no resuelto, a una distancia angular de unos 0,5 segundos (en la misma posición donde Chu había situado R136a2), cuya luminosidad viene a cifrarse en una quinta parte de la que despide R136a1 a longitudes de onda visibles. Además, Charles E. Worley, del Observatorio Naval de los Estados Unidos, ha confirmado la posición de R136a2 por observación visual. Creemos, pues, que la existencia de R136a2 ha quedado establecida con buena probabilidad.

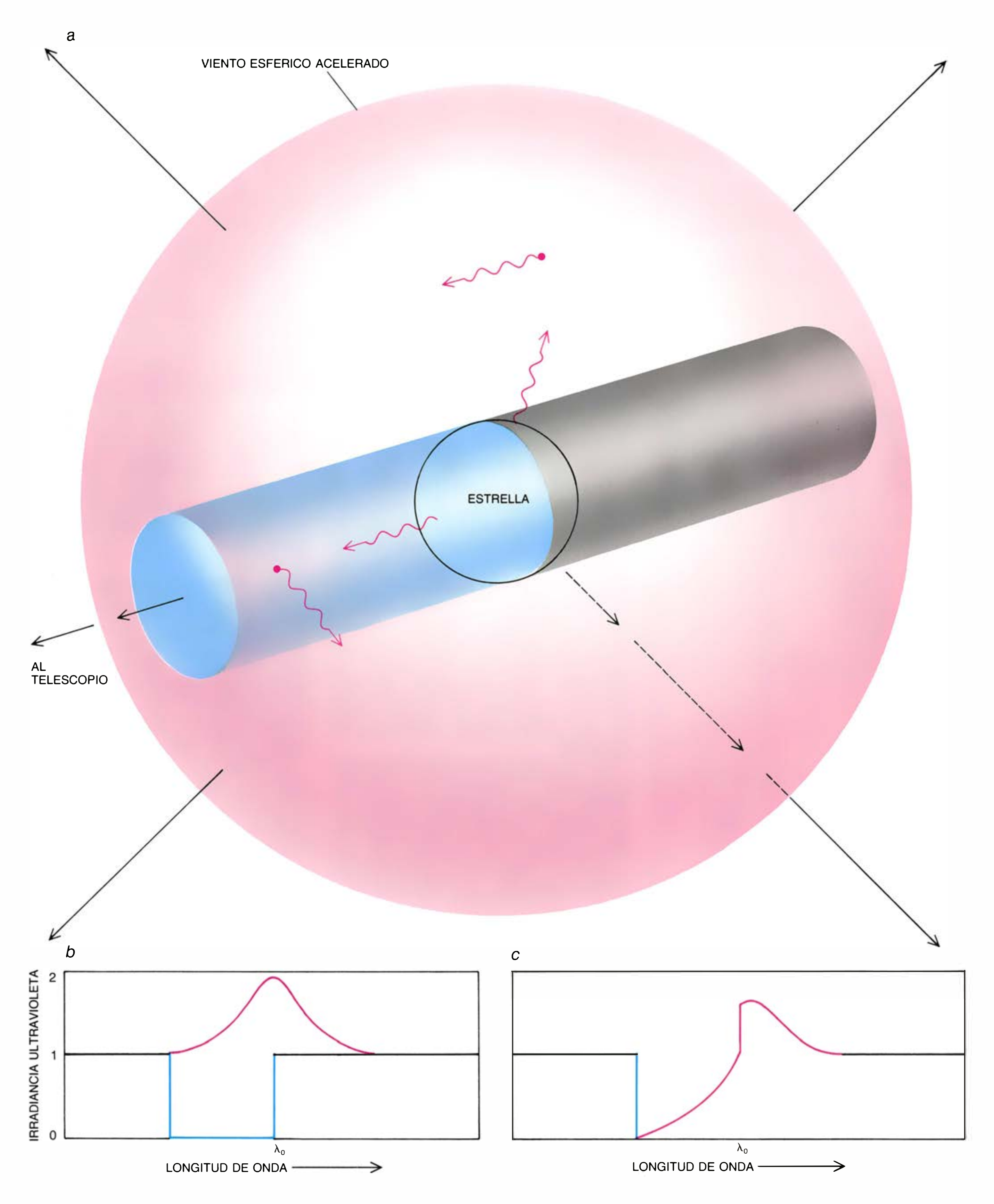
Los resultados de Weigelt mediante interferometría de moteado sugieren una complejidad mayor en la morfología de R136. Encuentra otra componente, que Chu llama a3, a sólo 0,1 segundo de arco de a1, demasiado próximo para que dicho autor pudiera resolverlo. Los resultados de interferometría de moteado no ayudan demasiado a determinar los brillos relativos, pero a3 parece comparable a a2, es decir, tiene un brillo de, aproximadamente, una quinta parte del que ofrece a1. Todos los observadores que han venido estudiando R136 desde la superficie terrestre concuerdan en la existencia de un fondo de estrellas, todavía más débiles, dentro de su imagen de tres segundos de arco.

Con los resultados de Weigelt, Chu estimó los brillos relativos de las tres componentes. La luz de la componente dominante, a1, equivale a la de seis estrellas como R122 o quizá 20 de las O3, más típicas. Según Weigelt, el diámetro angular de a1 no supera 0,08 segundos de arco, lo que equivale a unos 24 días-luz. Con criterio astronómico, ésta es una región pequeña. Por ejemplo, la estrella más próximo al Sol está a cuatro años-luz de distancia. Pese a ello, el radio del volumen de 24 días-luz es 55 veces la distancia del Sol a Plutón. En ese volumen caben seis estrellas, y hasta veinte.

¿Es R136a1 una estrella única, seis veces más luminosa que ninguna otra conocida, o constituye una agrupación de ellas, de un tipo afín, cada una, a R122? La cuestión reviste gran interés, porque una y otra hipótesis extienden la astronomía a objetos de mayor masa y luminosidad que cualquiera de los conocidos.

Si R136a1 es una estrella única, poseerá una masa entre 400 y 1000 veces la solar, lo que la convertiría en una estrella de masa al menos doble que la de cualquier otra catalogada. Se calcula la masa de un modo bastante directo a partir de la luminosidad. Las capas exteriores de la atmósfera de una estrella quedan retenidas por la atracción gravitatoria que se opone a la presión de la radiación emergente. La masa mínima para una estrella de luminosidad dada fue establecida por el astrónomo inglés A. S. Eddington, hace unos 60 años. Las estrellas no pueden vulnerar el límite de Eddington y estar en equilibrio mecánico, ni siquiera aproximadamente.

En 1970, Franz D. Kahn, de la Universidad de Manchester, mostró que las estrellas de masa muy grande quizá no pudieran formarse de las nubes de gas frío y polvo en donde se originan todas las estrellas. Por la razón siguiente: a medida que se contrae la nube, la densidad crece antes en la parte central que en las regiones exteriores. El núcleo se calienta, se subliman los granos de polvo y queda ionizado su gas. Se convierte en un objeto luminoso en ince-



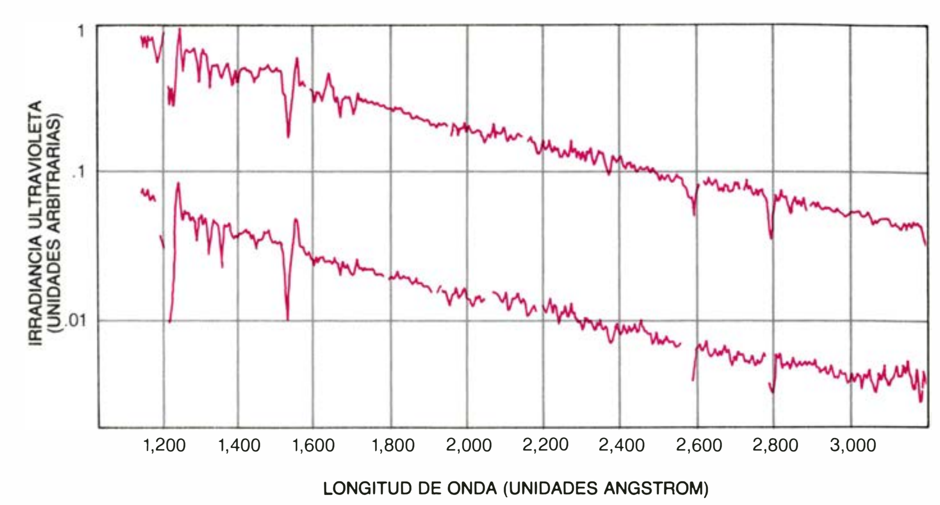
6. PERFIL ESPECTRAL P DEL CISNE, que se forma en la atmósfera en expansión (viento estelar) que rodea a una estrella sometida a pérdida de materia (*a*). La absorción corrida hacia ondas cortas (disminución del flujo de radiación a longitudes de onda más cortas que λ_0, longitud de onda que tendría la línea si la atmósfera no estuviera en expansión, como se muestra en *b*) se debe a los fotones difundidos fuera de la visual por iones, en la región azul del lado próximo de la estrella. En un viento estelar con simetría esférica, cada fotón dispersado fuera de la visual se ve compensado con otro dispersado hacia la misma por los iones, en el lóbulo rojo de emisión. Ocultos por la estrella, no aparecen los fotones difundidos hacia el observador desde detrás de la estrella (*región negra*). La longitud de onda del espectro a la que surge la luz difundida depende del ángulo entre la dirección del viento estelar en el punto de difusión y la posición del observador. Parte de los iones en el lóbulo de emisión tienen una componente de velocidad alejándose del observador, de modo que la luz que difunden está corrida hacia longitudes de onda mayores; otros tienen una componente de velocidad hacia el observador y están desplazados hacia longitudes de onda más cortas. El perfil P del Cisne (*c*) resulta de una combinación de tres efectos distintos; a saber: difusión fuera de la visual en la región azul, difusión hacia la visual desde la región roja y, por último, ausencia de fotones de la parte trasera de la estrella. El perfil P del Cisne del C IV de R136a muestra una gran absorción corrida hacia ondas cortas, lo que pone de manifiesto la existencia de un viento de muy alta velocidad.

sante desarrollo, que radia hacia fuera aproximadamente la mitad de la energía gravitatoria, convertida en calor por la contracción. De ello resulta una protoestrella rodeada de una zona libre de polvo que, a su vez, se ve ceñida por una capa polvorienta.

En la capa de polvo, la luz y la radiación ultravioleta de la protoestrella se convierten en radiación infrarroja, característica de las temperaturas más bajas a las que puede existir el polvo (alrededor de 1000 grados Kelvin). La radiación infrarroja es absorbida en la parte más externa de la nube en contracción, donde el gas que cae hacia dentro y el polvo están sólo débilmente ligados por la gravedad. La cantidad de movimiento, dirigida hacia fuera, de la radiación absorbida tiende a invertir la caída de los granos de polvo. Estos, moviéndose ahora hacia fuera, arrastran consigo el gas. Se detiene el crecimiento de la estrella.

De ahí que exista un límite superior (sólo de 40 masas solares en el trabajo original de Kahn) para la masa de la estrella central que permita que la materia continúe cayendo. El modelo de Kahn, sin embargo, es sensible a las propiedades supuestas para el polvo, como cabe sospechar por el papel esencial que el polvo desempeña en la inversión de la corriente. Mark G. Wolfire, ha mostrado que si Kahn hubiera supuesto una temperatura de sublimación del polvo de 2000 grados Kelvin, en lugar de 3600, el límite superior de la masa de la protoestrella podría haberse elevado hasta unas 1000 masas solares, manteniendo inalteradas todas las otras aproximaciones del modelo. Una temperatura de sublimación menor entra dentro de lo razonable; Edward P. Ney y sus colegas de la Universidad de Minnesota han descubierto que, en la capa de gas en expansión alrededor de una nova, el polvo se condensa cuando el gas se enfría hasta una temperatura de unos 2000 grados. Hay también otros procesos capaces de destruir los granos, como las colisiones con átomos de helio, al ser empujado el polvo por la radiación a través del gas, que podrían permitir la contracción de una masa mayor.

El contenido original de polvo por grano de nube protoestelar es otro dato a tener en cuenta. En nuestra propia galaxia, la relación de polvo a gas en la materia interestelar tiende a ser grande en el plano central y en regiones de la galaxia más próximas al centro que el Sol. Hacia las regiones exteriores de la galaxia, sin embargo, la abundancia de polvo disminuye.



7. FLUJO ULTRAVIOLETA DE R136a representado (*curva superior*) tal como se mide por encima de la atmósfera terrestre. El dominio de longitudes de onda fue observado por el espectrómetro del Explorador Ultravioleta Internacional; la lectura fue corregida de la atenuación debida al polvo de nuestra propia galaxia y de la Gran Nube de Magallanes. Para su comparación, se muestra la distribución de flujo de R122, una estrella del tipo O3, a la misma distancia que R136a (*curva inferior*). Las líneas espectrales son semejantes, salvo la línea del ion helio (He II) a 1640 angstrom. R136a brilla unas trece veces más que R122, que constituye la estrella "normal" de mayor luminosidad de la Gran Nube de Magallanes.

Sería improbable que una estrella de masa excepcional se formase en una región provista de una gran cantidad de polvo, ya que la presión de radiación, empujando al polvo, tendería a evitar el necesario colapso de una extensa nube del mismo. Se ha visto que la relación de polvo a gas en la proximidad de Dorado 30 vale un tercio de dicha relación en la vecindad del Sol. Es, por tanto, razonable suponer que en la región de Dorado 30 podría haber surgido una estrella de 400 masas solares.

La estructura de una estrella está determinada por varios procesos que se compensan, tales como el equilibrio entre la gravitación, dirigida hacia dentro, y la fuerza hacia fuera ejercida por la presión. En una estrella de masa respetable, la velocidad de generación de energía nuclear resulta muy sensible a la temperatura en el centro. Las perturbaciones, por ligeras que sean, tienden a intensificarse. Además, la presión que reina en el centro no es, principalmente, la del gas, sino la presión de radiación. Una estrella mantenida enteramente por la radiación puede dispersarse con facilidad; de hecho, con la radiación y la gravedad en equilibrio, se dispersará sin ninguna aportación ulterior de energía. Sólo la pequeña fracción de la presión que proviene del movimiento térmico del gas estabiliza la estrella de gran masa. Los cálculos han sugerido que las estrellas cuya masa supere 60 veces la solar podrían dispersarse en virtud de las pulsaciones que se producen en su interior.

Las estrellas de masa excepcional admiten un tratamiento matemático bastante sencillo. En 1962, Fred Hoyle, de la Universidad de Cambridge, y William A. Fowler, del Instituto de Tecnología de California, dedujeron las ecuaciones pertinentes. (Estaban interesados en objetos que alcanzaran una masa de hasta un millón de masas solares, que habían propuesto para explicar los objetos cuasi-estelares, o quasars, por entonces acabados de descubrir.) El interior de una estrella de gran masa está bien mezclado por corrientes convectivas ascendentes y descendentes. En una estrella de masa inferior a 60 masas solares, la mezcla interior puede conducir a un cambio en la composición química desde las capas interiores, donde la energía se transporta por convección, hasta las exteriores, donde la energía se transporta por radiación.

André Maeder, del Observatorio de Ginebra, ha demostrado que las estrellas de masa superior a 60 masas solares deben ser casi homogéneas: sus capas exteriores sufren rápida destrucción por parte de los vientos estelares. En tal estrella, la evolución se desarrolla de una manera sencilla. Al comienzo, el combustible nuclear de la estrella es el hidrógeno, que, en el curso de la combustión termonuclear, se convierte en helio. La composición de la estrella cambia, por tanto, gradualmente, desde un 70 por ciento en hidrógeno hasta predominar el helio. En dicho proceso, la estrella homogénea acorta su radio y aumenta su temperatura. Las de menor masa, en cambio, evolucionan desde estrellas bastante compactas de hidrógeno hasta estrellas gigantes mayores y más frías. La temperatura superficial de una estrella de gran masa aumenta

desde unos 60.000 grados Kelvin hasta unos 90.000, a medida que pasa el tiempo y se convierte en estrella de helio.

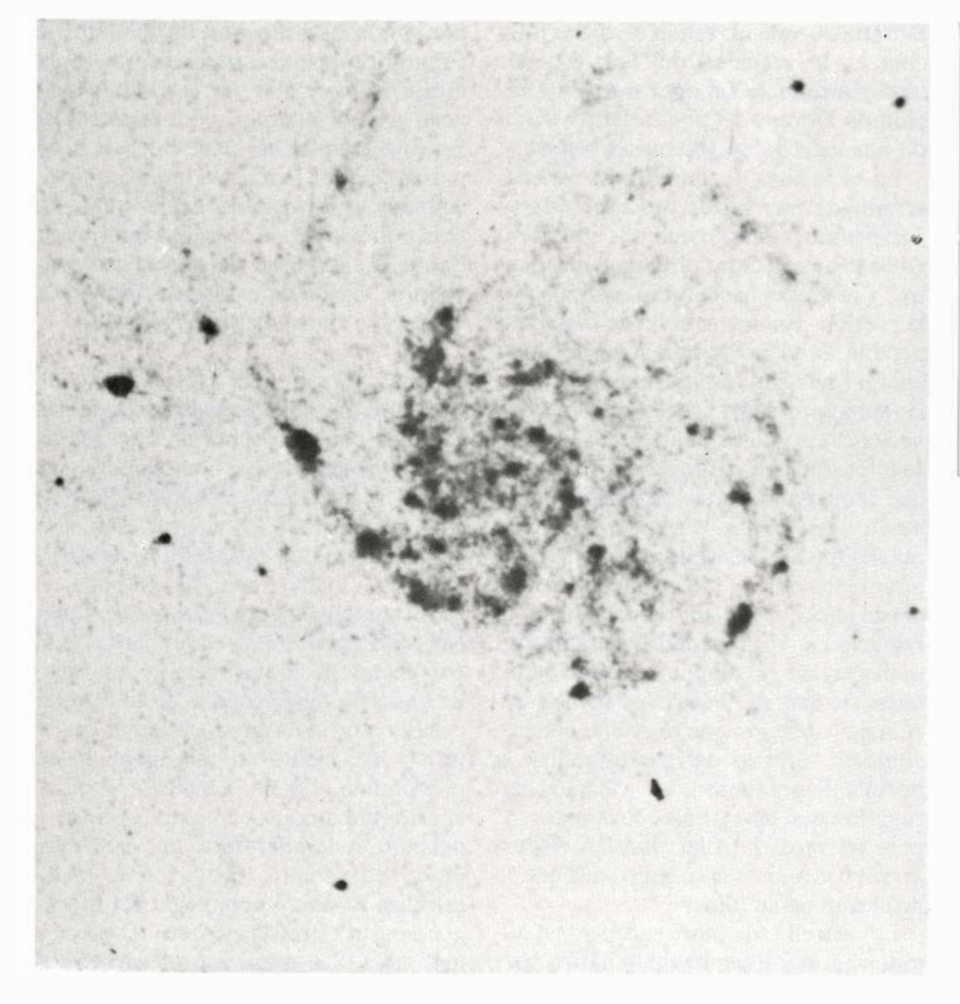
La ausencia de las líneas Si IV en el espectro ultravioleta de R136a1, que se caracterizan por su intensidad, nos habla de una temperatura del gas en concordancia con la hipótesis según la cual el objeto sería una estrella única. Podría esperarse, no obstante, que una estrella de gran masa fuese variable en su emisión de luz (y, por tanto, inestable) a causa de la precaria estabilidad de su estructura interna. Richard Stothers, del Instituto de Estudios Espaciales de la NASA, ha investigado varios procesos que pueden, en principio, aportar estabilidad a esa estrella; entre ellos, la rotación a gran velocidad y el entrecruzamiento de las líneas de fuerza de los campos magnéticos interiores. Admitiendo la existencia de procesos de esta clase actuando en R136a1, los datos de espectroscopía ultravioleta corroboran la hipótesis de una única estrella. Pero esos datos no excluyen otras posibilidades.

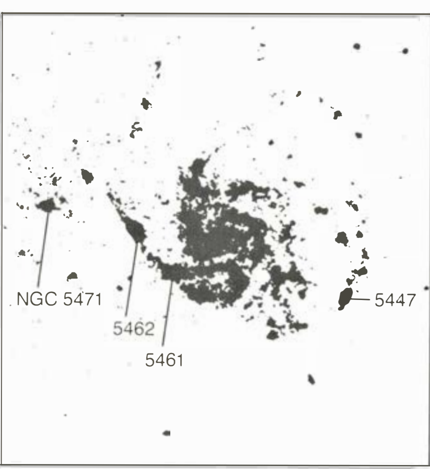
Anthony F. J. Moffat, de la Universidad de Montreal, y Wilhelm Seggewiss, del Observatorio Hoher List, en Alemania Occidental, creen que R136a1 es un conjunto compacto de estrellas, cada una de una masa comparable con la de las estrellas ya conocidas. Probablemente las estrellas de mayor masa que se conocen hoy sean R122 y Eta de Carina, objeto inestable rodeado por una espesa nube de polvo. La teoría estelar predice, para cada una de esas estrellas, una masa de unas 200 veces la solar. Como hemos indicado, una agrupación de estrellas que suministrase la energía de R136a1 requeriría, al menos, seis estrellas del tipo de R122 en un volumen notablemente pequeño.

Esa hipótesis plantea dos cuestiones: ¿No impediría la primera estrella, tan pronto como se hubiese formado, el nacimiento de otras por calentamiento del gas en contracción? ¿Cómo podría concentrarse tanto gas en semejante volumen sin haber ya colapsado? No hay respuesta, hasta la fecha, para esas preguntas, pero lo mismo puede decirse de otros muchos misterios que rodean la formación de estrellas.

Las imágenes en luz visible de Chu indican que la componente brillante, R136a1, está cerca del centro de un compacto cúmulo de estrellas. Esta observación abona una posibilidad interesante: que R136a1 se hubiera formado en virtud de la evolución dinámica de un cúmulo estelar. En regiones con alta densidad de estrellas, los encuentros gravitatorios entre estrellas pueden dar lugar a la evaporación, o pérdida, de estrellas de pequeña masa, provocando la contracción del cúmulo. Andando el tiempo, las estrellas de masa excepcional o los pequeños grupos de estrellas de masa excepcional se formarían por soldadura física de estrellas en tales colisiones. La teoría de la evolución dinámica de los cúmulos ha recibido considerable atención en los últimos años, gracias a su posible aplicación a la teoría del origen de los objetos luminosos, tan peculiares, hallados en el núcleo de las galaxias. Es emocionante pensar que R136a1 podría representar un ejemplo de soldadura estelar en una galaxia situada a las puertas de la nuestra.

Hasta aquí hemos considerado R136a1 bajo la hipótesis implícita de que el objeto consume hidrógeno, como una estrella más. Tal vez deberíamos fijarnos en posibilidades algo más exóticas. Por ejemplo, si existen los agujeros negros, la materia interestelar que describa órbitas espirales al caer





8. IMAGEN ULTRAVIOLETA de una galaxia distante, el sistema supergigante M101, tomada con un cohete de gran altitud en un proyecto llevado a cabo por T. P. Stecher y R. C. Bohlin, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). La imagen realza las estrellas calientes que ionizan el gas a su alrededor. En el mapa anexo, las cuatro flechas señalan nebulosas que son, al menos, cinco veces más luminosas que Dorado 30. La naturaleza de las fuentes que excitan la radiación de esas nebulosas no está clara. Además, es difícil determinarla, a causa de la distancia (unos 20 millones de años-luz). Los espectros obtenidos por el Explorador Ultravioleta Internacional sugieren que las cuatro fuentes son afines a R136a.

hacia uno de ellos formaría un disco de aglomeración. El proceso generaría grandes cantidades de radiación, dando lugar a la clase de brillo observado en R136a1. Otra posibilidad exótica a ponderar es el spinar, una masa en rotación de gas ionizado y magnetizado que se ha propuesto para justificar las grandes cantidades de radiación emitidas por los quasars.

Nuestra razón más poderosa para no recurrir a tales hipótesis en la interpretación de R136a1 se resume en lo siguiente: los datos de observación disponibles pueden explicarse mediante una extrapolación bastante sencilla de las estrellas de gran masa y consumidoras de hidrógeno en la secuencia principal de la evolución estelar. La distribución de la energía emitida en diferentes partes del espectro de R136a1 no se ajusta del todo a los actuales modelos teóricos de otras estrellas, pero las diferencias no son mayores que las que se encuentran en las luminosas estrellas del tipo O, y se deben probablemente a los efectos de los enormes vientos estelares. La velocidad del viento de R136a1 es grande, pero está en la línea de la del viento de las estrellas O3 ordinarias. La velocidad a la cual R136a1 pierde masa es enorme (una masa terrestre por semana), pero hasta eso concuerda con una extrapolación de las estrellas de tipo O y de Wolf-Rayet. Finalmente, debería esperarse que los agujeros negros y otros objetos exóticos dieran lugar a una gran emisión de rayos X. Knox S. Long, Jr., de la Universidad Johns Hopkins, trabajando con el satélite observatorio Einstein, ha observado rayos X procedentes de un objeto sito en el centro de Dorado 30. Aunque la emisión en rayos X dimanada de R136a y sus alrededores es grande (equivalente a unas 100 veces la totalidad de la energía emitida por el Sol), no está en desacuerdo con una extrapolación de las estrellas O.

Cualquiera que sea la verdadera naturaleza de R136a, no se tratará, a buen seguro, de un objeto único. En nuestra galaxia hay una región gigante ionizada (NGC 3603) con una luminosidad aproximada de la séptima parte de la que despide Dorado 30. Walborn observó la fuerte semejanza entre el objeto en el centro de NGC 3603 y R136a. Tal vez el primero sea una versión a tamaño reducido del otro.

Para hallar objetos afines a la nebulosa de Dorado 30, hemos de viajar hasta galaxias allende la Gran Nube de Magallanes. Frank Israel, del Observatorio de Leiden, y otros han estudiado las mayores nebulosas en galaxias hasta distancias de 25 millones de años-luz. Dentro de ese volumen, hay unas cuantas espirales con regiones notablemente activas donde se están formando estrellas calientes y de gran masa, y donde pueden detectarse las nebulosas ionizadas asociadas a las mismas. Israel ha confeccionado una lista de siete galaxias más, todas a distancias superiores a los diez millones de años-luz, que encierran nebulosas más luminosas que Dorado 30. Destaca por encima de todas la galaxia M101, que aloja cuatro nebulosas cuya luminosidad quintuplica de lejos la de Dorado 30. Una de éstas es NGC 5461, la nebulosa más luminosa conocida; equivale a once nebulosas de las características de Dorado 30. Se sabe poco de las fuentes que excitan tan enormes complejos gaseosos; se encuentran unas diez veces más lejos que Dorado 30, lo que significa que la Tierra recibe de sus estrellas componentes sólo una centésima parte de la radiación que le llega de las estrellas de Dorado 30.

Philip L. Massey y John B. Hutchings, han trabajado con el satélite Explorador Ultravioleta Internacional para examinar las estrellas luminosas de las grandes regiones ionizadas de la galaxia espiral M33, en el grupo local. De los siete objetos que consideraron, seis ofrecían espectros ultravioleta muy semejantes al de R136a. Desgraciadamente, M33 dista diez veces más de nosotros que R136; resulta, pues, imposible decidir si los espectros representan estrellas superluminosas o grupos altamente compactos de estrellas de características normales.

El Telescopio Espacial que la NASA planea lanzar en 1986 debe ayudar a aclarar las lagunas acerca de la naturaleza física de R136a. Con una resolución angular diez veces superior a la que puede alcanzarse desde el suelo, y con capacidad de realizar espectroscopía ultravioleta, el Telescopio Espacial determinará el brillo relativo, en el ultravioleta, de los diversos componentes de R136a. La gran estabilidad del telescopio a efectos de medida facilitará una cuidadosa investigación de la variabilidad de R136a. La detección de tal variabilidad limitará el dominio de posibles explicaciones para este objeto extraño. El telescopio se empleará también para estudiar los cuerpos centrales de otras nebulosas supergigantes, más allá de Dorado 30. Quién sabe si objetos tan escasos como R136a se repiten en los núcleos de la mayoría de las regiones ionizadas gigantes de otras galaxias.

Ciencia y sociedad

Intercambio espín-carga

Las moléculas orgánicas –es decir, las que poseen un esqueleto constituido principalmente por átomos de carbono unidos entre sí– suelen ser especies neutras eléctricamente. Se hallan envueltas en una nube de electrones, partículas de electricidad negativa. Así, el propano, un gas combustible bien conocido, está constituido por una cadena de tres átomos de carbono a la que se unen ocho átomos de hidrógeno; la nube está formada por veinte electrones periféricos. Si se elimina un electrón de una molécula de propano se obtiene una molécula con carga positiva; o sea, un catión. (Una molécula cargada negativamente se denomina anión.) También se obtiene un catión si se extrae de la molécula del propano una partícula negativa formada por un átomo de hidrógeno "H·" (un protón H^+ y un electrón "·") y un electrón ("·"); es decir, un ion hidruro "$H:^-$". El catión resultante –en el cual la carga positiva se ubica esencialmente sobre un átomo de carbono de la molécula del propano, unido sólo a tres átomos o trivalente–, es un ion carbenio.

Los iones carbenio, a diferencia de los cationes inorgánicos, como por ejemplo el ion sodio (constituyente de la sal común), suelen ser especies muy inestables y agresivas químicamente. Por ello, tienen una existencia muy efímera, constituyendo raramente materia en cantidad sustancial.

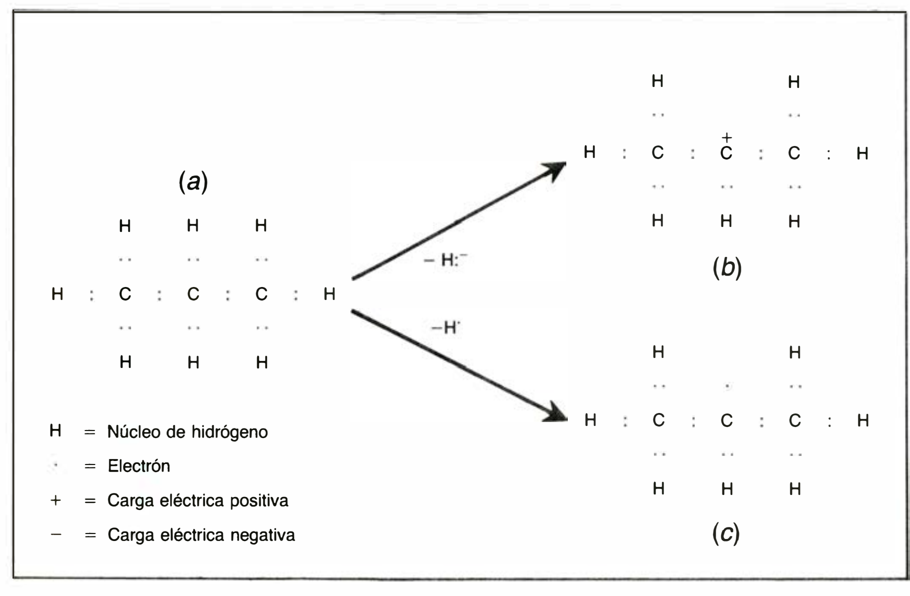
Si de la molécula del propano se extrae un hidrógeno con su electrón (H·), resulta entonces otra molécula eléctricamente neutra, con un átomo de carbono trivalente, o sea, unido a otros tres átomos. Estas moléculas se denominan "radicales libres", siendo, como en el caso de los iones carbenio considerados antes, especies de suma inestabilidad y agresividad química. Su vida suele ser muy corta, de millonésimas de segundo.

Si bien creo que las definiciones anteriores son suficientes para la comprensión de cuanto sigue, antes de continuar, es conveniente sin embargo que me refiera brevemente a un dominio singular de la química orgánica: la percloroorgánica. Iniciada a principios del siglo pasado por Faraday y Julin [*Investigación y Ciencia*, diciembre de 1976, págs. 90-98] y desarrollada principalmente por nosotros durante los últimos veinticinco años, la química percloroorgánica es paralela a la química orgánica convencional. A cada compuesto de ésta le corresponde, en principio, otro, perclorado, resultante de la sustitución de todos los átomos de hidrógeno de su molécula por otros tantos átomos de cloro y en los mismos lugares de la molécula [*véase la figura 2*]. Uno de los efectos de tal sustitución (persustitución) es una disminución espectacular y, en algunos casos, incluso una anulación de la reaccionabilidad química; se manifiesta también un gran aumento de la resistencia a la temperatura (estabilidad térmica). Así, por ejemplo, hemos logrado obtener sustancias poliméricas (plásticos) inatacables por agentes químicos de gran agresividad, y que por añadidura resisten temperaturas de hasta 600 grados; es decir, temperaturas del rojo incipiente.

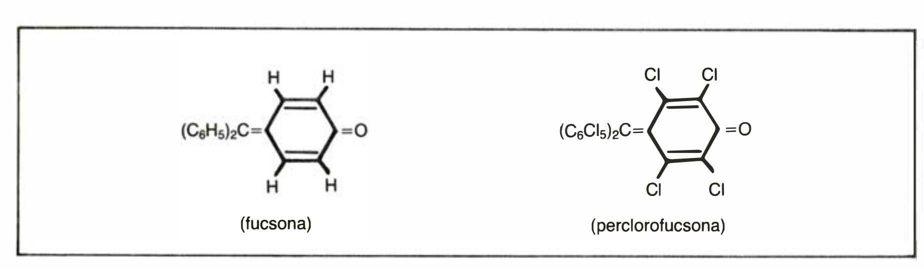
Hemos aplicado asimismo, con éxito, la percloración en la estabilización de algunas especies orgánicas de extraordinaria sensibilidad, química y térmica, que se destruyen fácil y rápidamente, e incluso que, por poseer una existencia muy efímera, de fracciones de segundo, sólo se pueden detectar empleando técnicas analíticas complejas. Así, estabilizando por percloración, hemos logrado sintetizar y aislar en forma sólida radicales libres del carbono trivalente cuyas vidas –extrapoladas experimentalmente– son del orden de un siglo, a los cuales hemos denominado "radicales libres inertes", en razón de su enorme inercia química y estabilidad térmica. Y también hemos sintetizado y aislado radicales libres del nitrógeno bivalente, de sorprendente estabilidad.

Los radicales libres se caracterizan por la presencia de un electrón solitario (monorradical) o de varios (dirradical, trirradical, etcétera). Estos electrones conllevan una propiedad denominada espín electrónico y, por ende, el paramagnetismo.

Los radicales libres inertes son, sin embargo, activos en ciertos procesos de transferencia electrónica, transformándose en cationes (iones carbenio) o aniones (carbaniones), que hemos aislado en forma de sales. Así, el radical perclorotrifenilmetilo (PTM·) –paradigma de radical libre inerte–, por transferencia electrónica se convierte en el catión PTM^+ o en el anión PTM^-, con ayuda de ciertos oxidantes o reduc-



1. *Moléculas cargadas eléctricamente y radicales libres orgánicos:* (**a**) *molécula de propano,* (**b**) *catión dimetilcarbenio y* (**c**) *molécula del radical 2-propilo*



2. *Ejemplo de un compuesto percloroorgánico: la perclorofucsona*

tores, respectivamente [*véase la figura 3*].

Como ya se ha indicado, los birradicales poseen dos electrones solitarios; suelen ser muy inestables. Sin embargo, en la pasada década logramos sintetizar y aislar algunos birradicales con el carácter de radical libre inerte. Entre ellos se encuentra el irradical percloro-$\alpha,\alpha,\alpha',\alpha'$, –tetrafenilbi-*p*-tolilo-α,α'-diilo, o abreviadamente, PTBT: cuya molécula presenta una notable agrupación de átomos: un sistema bifenílico perclorado. La percloración de esta agrupación determina que las dos partes de cualquier molécula que ella una (o separe) sean electrónicamente independientes; es decir, que una parte de la molécula no posea la capacidad de transmitir su influencia electrónica sobre la otra [*véase la figura 4*], fenómeno denominado inhibición estérea total de la deslocalización electrónica. (Normalmente suele hablarse de "inhibición estérea de la resonancia". Sin embargo, aquí ello podría causar alguna confusión, por cuyo motivo no se empleará este término.) Cada electrón solitario (espín electrónico) está totalmente localizado en su parte de la molécula y sólo en ella. Por eso, ciertas propiedades espectrales del dirradical PTBT: –el espectro de resonancia de espín electrónico y el de absorción ultravioleta-visible– son prácticamente coincidentes con las propiedades del monorradical PTM·, de estructura homóloga a la que presenta una mitad de la molécula del birradical PTBT:. Esta inhibición estérea total se manifiesta en todos los derivados perclorobifenílicos conocidos, dotados o no de carácter radicalario o iónico.

Ultimamente, continuando con el estudio de las transferencias electrónicas entre radicales libres inertes y sus iones, hemos logrado sintetizar el dicatión correspondiente al dirradical PTBT:, producto de la sustitución de sus dos electrones solitarios por dos cargas eléctricas positivas ($PTBT^{++}$). La sal correspondiente con el anión hexacloroantimoniato ($PTBT^{++}2SbCl_6^-$) es aislable, siendo un sólido cristalino, de color azul verdoso (el dirradical PTBT: es rojo).

Hemos observado que esa transferencia electrónica del PTBT: (el aceptor de los electrones –oxidante– es el pentacloruro de antimonio, que luego da lugar al anión $SbCl_6^-$) se produce en dos fases. Primeramente, se transfiere un electrón, dando el radical-catión $PTBT^{\cdot+}$, que es estable; y luego el otro (el electrón solitario del radical-catión $PTBT^{\cdot+}$), dando el dicatión $PTBT^{++}$. Este hecho ha quedado establecido me-

$$(C_6Cl_5)_3C^+ \underset{+e}{\overset{-e}{\rightleftharpoons}} (C_6Cl_5)_3C^{\cdot} \underset{-e}{\overset{+e}{\rightleftharpoons}} (C_6Cl_5)_3C^-$$

3. Transferencias electrónicas entre el radical perclorotrifenilmetilo (PTM·) y los correspondientes iones (PTM^+ y PTM^-)

4. Debido a la perpendicularidad de los dos anillos bencénicos perclorados del sistema bifenílico (**en color**)*, no existe influencia electrónica apreciable de una mitad de la molécula sobre la otra*

5. Oxidaciones y reducciones del sistema PTBT: | $PTBT^{\cdot+}$ | $PTBT^{++}$

6. Transferencias electrónicas entre el dirradical PTBT:, el dicatión $PTBT^{++}$ y el radical-catión $PTBT^{\cdot+}$

7. Intercambio de espín-carga (**a**) *y distribución aparente de espín electrónico y carga eléctrica positiva según la técnica de la resonancia de espín electrónico* (**b**)

diante el empleo de la resonancia de espín electrónico, y también químicamente (transformación del $PTBT^{\cdot +}$ y del $PTBT^{++}$ en otros compuestos químicos). Transferencia electrónica con dirradicales libres inertes que se ilustra en la figura 5.

En el Instituto de Química Orgánica, de Barcelona, nuestro centro de trabajo, hemos observado también que poniendo en contacto una molécula de PTBT: con otra de $PTBT^{++}$ se forman dos moléculas de $PTBT^{\cdot +}$. Y viceversa, dos moléculas del radical-catión $PTBT^{\cdot +}$ se transfieren un electrón, dando una molécula de PTBT: y otra de $PTBT^{++}$. Así pues, entre estas tres especies moleculares existe un equilibrio de transferencias electrónicas reversible. La observación directa e inequívoca –incluso cómoda– de este fenómeno quimicofísico insólito ha sido posible merced a situarse el mismo dentro del dominio de la química percloroorgánica que, como se ha indicado ya –a diferencia de la química orgánica convencional–, permite manejar sin dificultad ciertas clases de especies químicas normalmente fugaces.

El estudio de la estructura hiperfina (acoplamientos con núcleos de carbono 13, en abundancia natural) del espectro de resonancia de espín electrónico del radical-catión $PTBT^{\cdot +}$ muestra inesperada y sorprendentemente que sus dos mitades resultan *equivalentes*; es decir, que cada mitad *parece* poseer medio electrón solitario y media carga eléctrica positiva. (El "carbono natural" es carbono 14 con un 1,1 por ciento de carbono 13.) Este resultado sería ya de extraordinario interés teórico si no existiera la inhibición estérea de la deslocalización electrónica en el sistema perclorobifenílico, aludida antes. En tal caso, las dos mitades de la molécula del radical-catión $PTBT^{\cdot +}$ serían equivalentes, distribuyéndose equitativamente (mesomería) el electrón solitario (espín) y la carga.

Sin embargo, debido a la inhibición

estérea total de la deslocalización electrónica, esa explicación es inválida. Por consiguiente, en el radical-catión PTBT$^{\cdot +}$ existen *dos* especies moleculares *equivalentes* en rápida interconversión, de las cuales la relativamente lenta técnica de resonancia de espín electrónica "ve" el promedio de sus distribuciones de electrón solitario (espín electrónico).

Existe pues, una rápida conversión de cada molécula de radical-catión PTBT$^{\cdot +}$ en su equivalente; en suma, un intercambio electrónico interno, que hemos denominado intercambio espín-carga.

Empleando un símil fotográfico, el fenómeno de intercambio espín-carga es descriptible de la manera siguiente. Supóngase en una habitación (molécula del radical-catión) dos sillas iguales (dos cargas eléctricas positivas) y un personaje (un electrón solitario, con su carga eléctrica negativa). Supóngase además que éste está "sentado" inicialmente en una de las sillas (disposición eléctricamente neutra) y que pasa inmediatamente a sentarse en la otra silla, para volver nuevamente a la primera, y así sucesiva y rápidamente. Supóngase ahora que se dispone de una cámara fotográfica (la técnica espectral) que dispara con una velocidad de obturación relativamente lenta. Entonces, *todas* las fotografías de una serie –de 100, por ejemplo– mostrarán el individuo sentado simultáneamente en las dos sillas, como si gozara del don de la "bilocación" (deslocalización electrónica). Sin embargo, con una gran velocidad de obturación se obtendrá entonces una serie de fotografías que mostrarán, la mitad de ellas (50), al personaje sentado en una silla, y la otra mitad (50), en la otra silla (igual probabilidad).

Resumiendo. En primer lugar, el fenómeno fundamental del intercambio espín-carga no es una deslocalización electrónica. En segundo lugar, la demostración de su existencia es experimental, directa e inambigua. Y por último, la química percloroorgánica nos ha deparado, una vez más, la ocasión de observar un fenómeno excepcional, que ayudará indudablemente a una mejor comprensión del movimiento de los electrones y las cargas eléctricas en el seno de la materia orgánica. (Manuel Ballester, Instituto de Química Orgánica Aplicada de Barcelona.)

Anodizado del aluminio

El aluminio, elemento metálico con gran avidez por el oxígeno, expuesto al aire se recubre con una capa de óxido para protegerlo del ataque atmosférico. Esta capa de óxido de aluminio natural posee muy poco espesor (entre 0,01-0,02 micrometros), es poco adherente y no demasiado dura, pudiendo ser destruida fácilmente.

Con objeto de conferir a este metal de una película de óxido de mayor espesor, más dura y con posibilidades, además, de ser coloreada, se introdujo la técnica de la oxidación artificial del aluminio, técnica denominada oxidación anódica o anodizado del aluminio. La técnica de protección del aluminio por formación sobre su superficie, mediante el paso de la corriente eléctrica continua, de una película de óxido data del año 1857, aunque su utilización industrial se remonta a una fecha más reciente: mediada la década de 1920.

El anodizado produce en el metal una capa de óxido con una serie de cualidades importantes de utilización: en primer lugar esta capa opone una tenaz resistencia a la corrosión atmosférica; en segundo lugar, posee unas importantes propiedades dieléctricas, que podemos robustecer mediante tratamientos adecuados; en tercer lugar, esta capa es transparente, dotada, además, de una gran capacidad de absorción de aceites, grasas y cierto tipo de colorantes; y, por último, presenta una gran dureza, muchísimo mayor, desde luego, que la del metal-base aluminio que recubre, e incluso superior a la del metal cromo.

Todas estas propiedades de la capa de óxido de aluminio lograda artificialmente indujeron a perfeccionar la técnica de su obtención, habiéndose investigado distintos tipos de electrólitos. De entre los diferentes baños electrolíticos propuestos cabe destacar los siguientes: electrólitos de ácido sulfúrico, electrólitos de ácido oxálico, electrólitos de ácido crómico, electrólitos de ácido fosfórico, electrólitos de ácido bórico y otros.

Todos estos tipos de baños electrolíticos han quedado hoy reducidos a tres: baños de ácido sulfúrico, baños de ácido oxálico y baños de ácido crómico. Los electrólitos basados en el ácido sulfúrico y en el ácido oxálico se han usado y se vienen usando más ampliamente que los electrólitos de ácido crómico. En numerosos países, sin embargo, se siguen empleando todavía electrólitos de ácido crómico para el tratamiento de piezas utilizadas en los fuselajes de los aviones: esas piezas poseen junturas o ensambles, agujeros ciegos o áreas donde el electrólito puede quedar retenido (a pesar de los subsiguientes enjuagues); el ácido crómico que allí puede quedar estancado no produce corrosión, a diferencia de lo que ocurriría si el ácido estancado fuera el sulfúrico, que disolvería el óxido de aluminio.

Cuando es imprescindible que la superficie de la pieza de aluminio posea un alto grado de brillo o cuando se desea que la película de óxido tenga una gran dureza o sea posteriormente coloreada, debe utilizarse como electrólito un baño de ácido sulfúrico, un baño de ácido oxálico, o bien un baño mixto de ácidos sulfúrico y oxálico. Estos baños son los habituales para la obtención de las piezas y objetos de aluminio anodizado que estamos acostumbrados a ver a nuestro alrededor: adornos y apliques para automóviles, caperuzas y cubiertas de plumas, bolígrafos y rotuladores, estuches de un sinfín de utensilios, electrodomésticos, paneles, marcos y perfiles para arquitectura y decoración de edificios, carpintería metálica en general, objetos de bisutería, placas rotuladas, etc.

El proceso completo de la oxidación anódica del aluminio no se limita a la oxidación propiamente dicha. La pieza u objeto de aluminio a ser anodizado atraviesa las siguientes fases: tratamiento mecánico previo, que deje las piezas a anodizar exentas de rebabas y con una superficie uniforme; tratamiento químico o electroquímico preliminar de desengrasado y decapado o desoxidado que active la superficie de las piezas de aluminio, separando de la misma cualquier película de grasa, aceite u óxido; abrillantado, semiabrillantado o mateado, químico o electroquímico; oxidación anódica o anodizado de esas piezas en alguno de los baños electrolíticos mencionados (operación de "anodizado" u "oxidación anódica" propiamente dicha); coloreado; sellado o fijación de los poros formados en el anodizado del aluminio (con objeto de cerrar toda comunicación entre el metal-base aluminio sobre el que se ha formado la capa de óxido y el exterior), y secado.

El mecanismo de formación de la capa de óxido de aluminio en el proceso electrolítico del anodizado difiere del proceso, también electroquímico, de la electrodeposición de metales. En efecto, en el proceso de la electrodeposición, el metal se deposita sobre el electrodo negativo (cátodo) sumergido en un electrólito apropiado, disolviéndose el metal constituyente del ánodo (electrodo positivo) y creciendo siempre la capa de metal depositado desde la superficie de la pieza hacia fuera. En el proceso de la oxidación anódica, por el contrario, el metal aluminio actúa como electrodo positivo (ánodo), recubriéndose de una película de óxido que se inicia en el límite exterior de la superficie de la pieza de aluminio y va creciendo hacia dentro. De este modo, pues, mientras en el proceso de la electrodeposición ésta no afecta directamente al metal integrante de la pieza, en el proceso del anodizado de aluminio el metal se ve afectado y transformado en óxido de aluminio.

En el anodizado no existe aportación de material a la pieza y las dimensiones originales de ésta se mantienen inalteradas, si bien se recubre de una película antes inexistente, de características físicas, químicas y mecánicas muy diferentes de las propias del metal-base aluminio. La continuidad del proceso en la oxidación anódica tiene lugar entre el óxido formado al comienzo y el metal-base aluminio. Este óxido inicial no actúa como aislante entre el metal-base subyacente y la solución-electrólito que lo rodea, sino que, debido a la porosidad de la película, la solución-electrólito penetra a través de la película y establece contacto con el metal-base aluminio. De esta manera, las dimensiones de la pieza no sufren alteración apreciable, pues aunque el espesor de la misma tiende a aumentar debido a que el volumen del óxido de aluminio es superior al volumen del aluminio metal, al entrar en juego el poder disolvente de la solución-electrólito se disuelve una parte superficial del aluminio y se produce una ligera disminución de las dimensiones de la pieza, que contrarresta el aumento dimensional provocado por el óxido de aluminio formado.

Este mecanismo de formación de óxido de aluminio viene apoyado por la teoría de la existencia de dos capas de óxido diferentes, teoría introducida por Setoh y Miyata y confirmada posteriormente por Akimov, Tomashov, Tyukina y Byalobzeskyi. Según esta teoría, una de estas capas es externa, hidratada, porosa y gruesa; crece sobre la segunda capa, interna, en contacto directo con la superficie del aluminio, compacta y de muy poco espesor, denominada capa activa, capa dieléctrica o capa barrera. Las características de esta capa delgada son iguales a las de la capa natural de óxido que se forma sobre el aluminio abandonado a la atmósfera, habiéndose asignado un espesor comprendido entre 0,01 a 0,1 micrometros; la capa externa, porosa, puede alcanzar espesores muchísimo mayores (de hasta 100 micrometros según el electrólito utilizado y las condiciones de electrólisis).

Esta capa delgada ("capa barrera") se forma mediante uno de los cuatro mecanismos siguientes: (*a*), por paso de iones oxígeno (aniones) a través de la primitiva película natural de óxido y formación en el interior de la misma de óxido de aluminio; (*b*), por paso de esos iones a través de esa primitiva película, forzados por un campo eléctrico de gran intensidad, formándose seguidamente una delgada película sobre la superficie; (*c*), por roturas locales de la película primitiva por parte del electrólito y formación de óxido de aluminio en las porciones expuestas del metal aluminio, con descarga simultánea de aniones; y (*d*), por rotura eléctrica de la película primitiva en numerosos puntos y formación subsiguiente de óxido de aluminio. Fuere cual fuere el mecanismo de formación, una vez creada esta capa barrera se inicia el ataque de la superficie por parte del electrólito y

comienza la conversión en una capa hidratada mucho más gruesa. Los poros existentes en esta capa permiten el paso del electrólito; éste ataca la delgada película superficial existente sobre el aluminio. Disuelta por ese ataque continuado, la capa barrera torna a formarse, permaneciendo su grosor, a escala microscópica, prácticamente constante durante el transcurso del proceso. Por contra, la otra capa, porosa, aumenta su espesor, creciendo, no por la cara que da al electrólito, sino por la cara enfrentada al metal-base aluminio, adoptando los poros el aspecto de un cono truncado con la base (hueca) mayor por el lado del electrólito.

De lo dicho se desprende que la velocidad de crecimiento de la capa de óxido de aluminio será función del predominio de la velocidad de crecimiento de la película por el lado del metal-base sobre la velocidad de disolución de la película por el lado del electrólito; sin embargo, el espesor de la capa de óxido queda limitado a un cierto valor tope, función del tipo de electrólito usado y de los parámetros de electrólisis, especialmente la temperatura. Valor tope de espesor que es, muchas veces, el factor decisivo que nos lleva a elegir el tipo de electrólito. (Enrique Julve.)

Materia de recuerdos

¿Cómo se almacenan los recuerdos en el cerebro? El mecanismo preciso sigue resistiéndose a la identificación; con todo, el almacenamiento debe acompañarse de algún cambio cerebral perdurable: algo que afecte al modo de procesar la información por parte del cerebro. El tratamiento de la información se apoya en la transmisión de señales de una célula a otra a través de contactos intercelulares denominados sinapsis. Es más, la capacidad de llevar a la memoria acontecimientos fugaces sugiere que dicho cambio pueden inducirlo fenómenos cerebrales breves.

Gary Lynch y Michel Baudry, de la Universidad de California en Irvine, postulan un candidato para lo que han dado en describir como "los procesos bioquímicos involucrados en el almacenamiento de memoria". Observaron, en el hipocampo, los resultados de esos procesos.

Se sabía que la excitación de circuitos de neuronas del hipocampo podría aumentar, durante meses, la sensibilidad de las células a posteriores señales; tal fenómeno se denomina potenciación a largo plazo, o LTP (por *L*ong-*T*erm *P*otentiation). Se trata, por tanto, de una alteración funcional perdurable generada por un fenómeno transitorio. La cuestión residía en determinar los cambios bioquímicos y estructurales que subyacen a esa alteración de la función.

Un dato a considerar era que los circuitos del hipocampo que muestran la potenciación a largo plazo emplean, de neurotransmisor (la sustancia que atraviesa la sinapsis), un aminoácido. Parece que el ácido es el glutamato. Lynch y Baudry prepararon cortes de hipocampo de ratas, los sometieron a una estimulación eléctrica para provocar la potenciación a largo plazo y a continuación (de 5 minutos a una hora después) estudiaron fracciones de membrana sináptica. Observaron un aumento en el número de receptores de glutamato. Simultáneamente se advirtieron, al microscopio electrónico, ciertos cambios estructurales en tejido de hipocampo sometido a potenciación a largo plazo. Las proyecciones dendríticas, protusiones espinosas por las que las extensiones de las neuronas reciben las señales sinápticas de otras células, aparecían más redondeadas. Además, el número de sinapsis de las extensiones dendríticas del cuerpo celular había aumentado hasta en un 30 por ciento.

Se sabía también que la potenciación a largo plazo parecía depender de la disponibilidad de calcio. El aumento de receptores de glutamato se mostró asimismo dependiente del calcio. Consecuentemente, Lynch y Baudry buscaron (y hallaron) una enzima unida a la membrana neuronal y actividada por calcio que, de manera irreversible, "descubriera receptores de glutamato". Constataron además que la enzima (del tipo de las denominadas calpaínas) actuaba sobre la proteína fodrina, ubicada en la cara interior de la membrana neuronal. La disgregación de la fodrina explicaría verosímilmente el descubrimiento de receptores, así como el cambio de forma de las proyecciones espinosas de las dendritas.

Lynch y Baudry proponen la siguiente secuencia. Las descargas de señales neuronales aumentan el flujo de iones calcio hacia el interior de las células nerviosas que reciben las señales. El calcio activa en éstas la enzima calpaína, que cuartea la membrana, lo que a su vez abre receptores de glutamato hasta entonces bloqueados, reforzando la respuesta de la sinapsis a señales posteriores. En una escala mayor, la disgregación altera la forma de las proyecciones dendríticas. La secuencia parece independiente de los mecanismos bioquímicos que intervienen en la actividad cerebral "cotidiana". Es más, se dispone de drogas capaces de bloquear la calpaína, por lo que cabe poner a prueba la hipótesis.

Proteínas de oncogenes

Los genes que producen cáncer son versiones alteradas de genes normales, que determinan proteínas con misiones importantes en las células. Las proteínas oncogénicas inducen cáncer al imitar parcialmente la función de las normales

Tony Hunter

A los genes que producen cáncer se les llama oncogenes. Son versiones alteradas de otros que, por lo general, desempeñan un papel benigno en células normales. ¿Qué los convierte en oncogénicos? Como otros genes, los oncogenes determinan proteínas, moléculas fundamentales en el mantenimiento de la estructura de las células, que catalizan, además, sus reacciones bioquímicas, estableciendo su forma y función. Las proteínas determinadas por los oncogenes desarrollan funciones anormales y provocan la transformación de una célula normal en cancerosa. ¿Qué tipo de proteínas son y qué mecanismos utilizan para transformar las células? Tras una década de intensas investigaciones sabemos ya que las proteínas "transformantes" presentan una serie de características funcionales comunes, lo que sugiere que no son muchos los mecanismos que originan el cáncer y que quizá lleguen a conocerse algún día.

Los oncogenes han salido a la luz durante el desarrollo de dos líneas de investigación convergentes, aunque dispares. La primera de ellas era un estudio sobre los retrovirus: virus cuyo material genético no es ADN, sino ARN que se "retrotranscribe" en ADN cuando el virus infecta una célula animal. Algunos retrovirus llevan entre sus genes el responsable de una rápida oncogénesis. Dicho gen se identificó a principios de la década de 1970 en el virus del sarcoma de Rous (RSV), que produce cáncer en pollos; el gen se llamó *src*, aludiendo a sus orígenes. (Desde entonces, otros oncogenes se han venido designando con abreviaturas similares, siempre de tres letras.) Al poco tiempo, Raymond L. Erikson y Joan S. Brugge, a la sazón en la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado, aislaron la proteína determinada por el gen *src*, que se denominó p60*src*, por tener un peso molecular de 60.000 dalton.

En 1975, J. Michael Bishop y Harold E. Varmus, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, observaron que *src* no constituía ningún gen vírico. Tratábase de una copia casi exacta de un gen que se encuentra en todas las células de pollo. El "proto-oncogén" había sido capturado por un retrovirus levemente oncogénico durante un ciclo infectivo y en el proceso se convirtió en un gen del cáncer [véase "Oncogenes", por J. Michael Bishop; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1982]. Hoy se cuenta con un buen número de oncogenes, aislados a partir de retrovirus que producen carcinomas, sarcomas, leucemias o linfomas en pollos, otras aves, ratas, ratones, gatos y monos. En cada caso, el oncogén es muy parecido a un gen normal del hospedador y determina una proteína similar a una proteína normal.

En los últimos cinco años una segunda línea de investigación ha permitido descubrir nuevos oncogenes, pero esta vez en tumores de animales, no en retrovirus. Robert A. Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachussetts, Geoffrey M. Cooper, del Instituto del Cáncer Dana Farber, Michael Wigler, de Cold Spring Harbor, y Mariano Barbacid, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, junto con sus respectivos colegas, y de forma independiente, han encontrado genes en el ADN de varios tipos de células cancerosas que, cuando se introducen ("transfectan") en cultivos celulares normales, los transforman en cancerosos. Esos genes también son copias de proto-oncogenes. Presumiblemente, aunque no ha podido todavía demostrarse de un modo directo, cada oncogén de esos contribuyó a producir el tumor del que se aisló.

Un solo grupo

Los tumores humanos de donde se aíslan los oncogenes no son inducidos por retrovirus. No había pues razón para esperar que los oncogenes de tumores fuesen los mismos que los de retrovirus. Sin embargo, existen ciertos solapamientos entre ambos grupos. El oncogén de origen tumoral aislado más frecuentemente se ha demostrado homólogo al oncogén retrovírico *ras*, presente en la estirpe Harvey del virus de sarcoma de ratón. En tumores humanos aislados se han identificado versiones alteradas de genes celulares homólogos a varios oncogenes retrovíricos, aunque en esos casos no se ha demostrado directamente que los genes alterados fueran oncogénicos. Probablemente los experimentos con retrovirus y los de transfección hayan sacado a relucir oncogenes que son miembros del mismo grupo de genes normales, que de vez en cuando se activan y se convierten en genes del cáncer.

Puede que el grupo no sea muy grande. Algunos oncogenes se han aislado ya más de una vez, lo que indica que no deben quedar muchos por descubrir. Se estima que el hombre tiene unos 30.000 genes, de cuyo número no llegaría a 100 el de proto-oncogenes. Comparten todos, según parece, haberse conservado muy bien durante la evolución. Así, el gen proto-*src* se encuentra en vertebrados y en *Drosophila*, la mosca del vinagre; el gen proto-*ras* está presente en especies que van desde las levaduras hasta el hombre. Esta constancia revela que los proto-oncogenes deben desempeñar funciones importantes en la célula.

¿Cómo se convierten los proto-oncogenes en oncogenes? Hay varias posibilidades. En algunos casos, el origen de un oncogén es una mutación, presumiblemente causada por un agente carcinogénico (la mayoría de los carcinógenos conocidos son mutágenos); la proteína determinada por el oncogén mutante difiere ligeramente de la proteína normal. En este sentido, Weinberg y Barbacid han encontrado que la

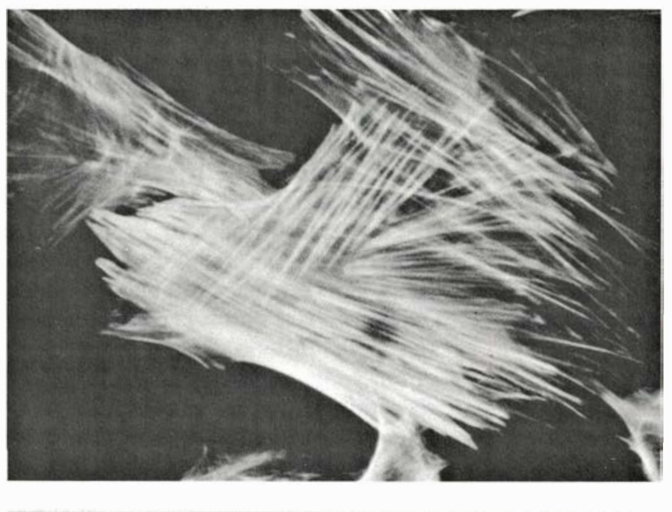
secuencia de nucleótidos (subunidades del ADN y ARN) del oncogén *ras*, aislado por ellos, difiere en un solo nucleótido de la secuencia del correspondiente proto-oncogén [véase "Base molecular del cáncer", por Robert A. Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1984]. En una secuencia de ADN, cada tres nucleótidos ("codón") determinan uno de los 20 aminoácidos diferentes que componen una secuencia de proteína. La estructura y función de una proteína vienen determinadas por el orden de sus aminoácidos, de forma que el cambio de uno solo de ellos puede acarrear consecuencias importantes. La mutación presente en el gen *ras* altera uno de los aminoácidos del producto genético, convirtiendo la proteína normal en oncogénica.

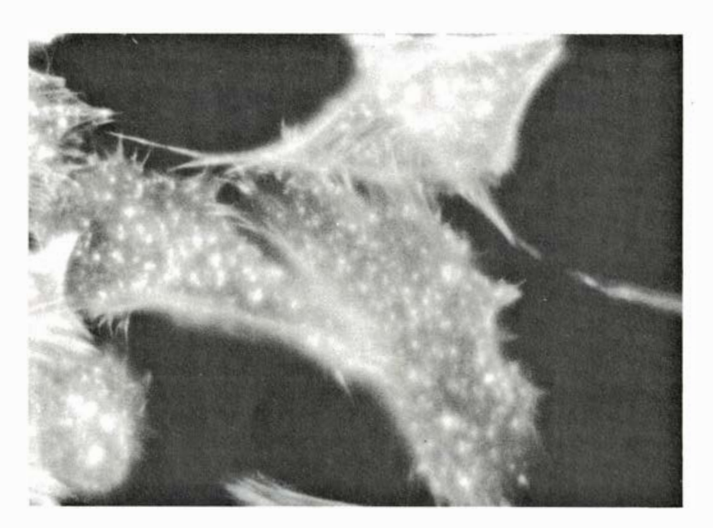
La activación puede deberse también a un efecto de "dosis". En comparación con las correspondientes células normales, algunas proteínas oncogénicas se encuentran en cantidades muy altas en las células transformadas. Ello puede deberse a un fallo en la regulación génica o a que hay muchas copias del gen correspondiente. En células transformadas por virus, la proteína oncogénica se fabrica en grandes cantidades porque el oncogén funciona como un gen vírico activo. En otros casos, un gen se puede expresar (se traduce en proteína) de forma inapropiada, bien porque lo haga en un tipo celular que no es el normal o bien porque se exprese en un momento del ciclo de vida celular que no es el adecuado.

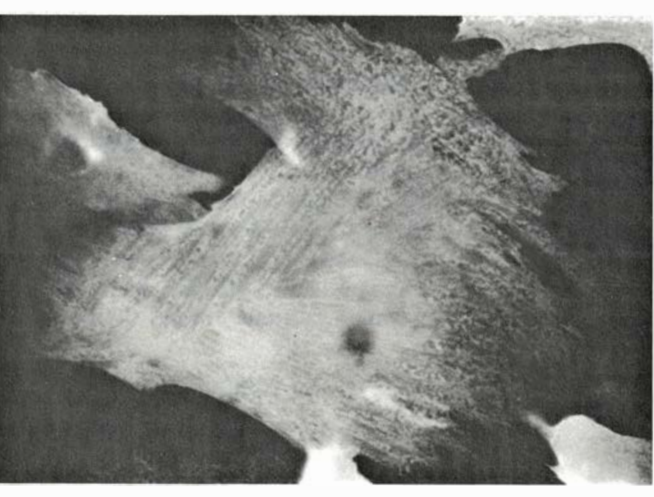
Quinasas

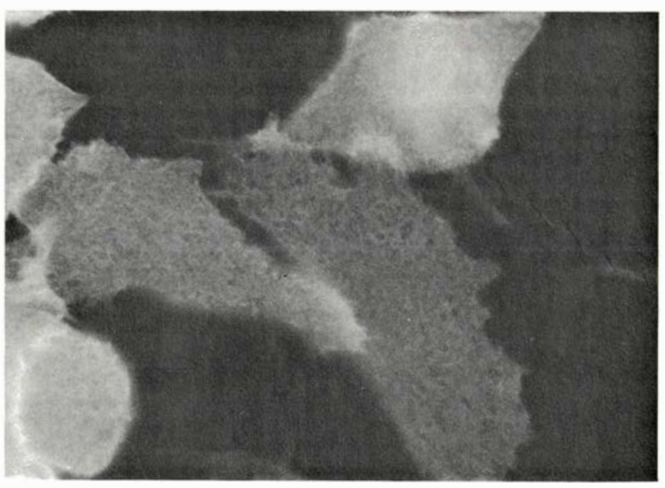
Cualquiera que sea el mecanismo específico que convierte un proto-oncogén en oncogén, éste ejerce su efecto a través de la proteína que determina. Gran parte de lo que se conoce de tales proteínas procede de los trabajos de Erikson y Marc S. Collett. Cuando, en 1978, aislaron la proteína p60*src* a partir de células infectadas con RSV, encontraron que dicha proteína tenía actividad enzimática: catalizaba la adición de una molécula de fosfato a otras proteínas. El descubrimiento revestía enorme interés, pues, según se sabía, la fosforilación desempeñaba un papel importante en la regulación de la función de las proteínas. Las enzimas que fosforilan proteínas se denominan quinasas (del griego *kinein*, "mover"); tienen por misión transferir a otras proteínas el grupo fosfato terminal, rico en energía, del trifosfato de adenosina (ATP), el principal transportador energético de la célula.

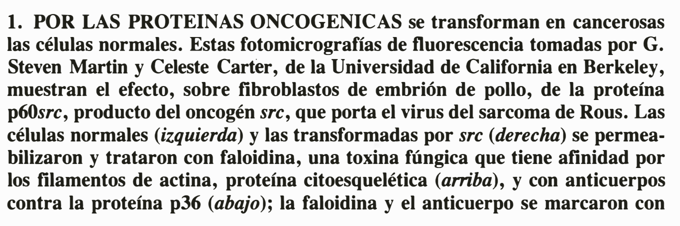
Cuando se comprobó que p60*src* era una quinasa se conocían otras enzimas similares. Se supuso que p60*src* se les











1. POR LAS PROTEINAS ONCOGENICAS se transforman en cancerosas las células normales. Estas fotomicrografías de fluorescencia tomadas por G. Steven Martin y Celeste Carter, de la Universidad de California en Berkeley, muestran el efecto, sobre fibroblastos de embrión de pollo, de la proteína p60*src*, producto del oncogén *src*, que porta el virus del sarcoma de Rous. Las células normales (*izquierda*) y las transformadas por *src* (*derecha*) se permeabilizaron y trataron con faloidina, una toxina fúngica que tiene afinidad por los filamentos de actina, proteína citoesquelética (*arriba*), y con anticuerpos contra la proteína p36 (*abajo*); la faloidina y el anticuerpo se marcaron con distintos colorantes fluorescentes. Mientras que los haces de filamentos de actina entrecruzan las células normales de forma regular (*arriba, a la izquierda*), en las células transformadas (*arriba, a la derecha*) los haces de actina se han desorganizado, originando en parte los cambios de forma característicos de las células cancerosas; la actina acaba redistribuyéndose en pequeños agregados. La proteína p60*src* es una quinasa: enzima que añade grupos fosfato a otras proteínas, por ejemplo, la p36. Se observa en estas fotografías que p36 se distribuye bajo la membrana plasmática, tanto en las células normales (*abajo, a la izquierda*) como en las transformadas (*abajo, a la derecha*).

parecería en que transferiría fosfatos a uno de los aminoácidos, serina o treonina, que tienen grupos hidroxilos (OH) a los que unir el fosfato. Por ello constituyó una sorpresa que Bartholomew M. Sefton y el autor descubrieran que p60*src* fosforilaba tirosinas, el otro aminoácido que porta un grupo hidroxilo. Al mismo tiempo, Owen N. Witte y David Baltimore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, publicaron que P120*abl*, la proteína transformante de un retrovirus de leucemia de ratón, transfería también grupos fosfato a tirosinas. En principio pareció que la fosforilación de tirosinas constituía una propiedad exclusiva de las dos proteínas oncogénicas; pronto vimos, sin embargo, que todas las células normales tenían pequeñas cantidades de fosfotirosinas en sus proteínas, señal de que las células normales también disponían de quinasas específicas de tirosinas. La primera en identificarse en una célula normal fue, nada menos, el producto del gen proto-*src*.

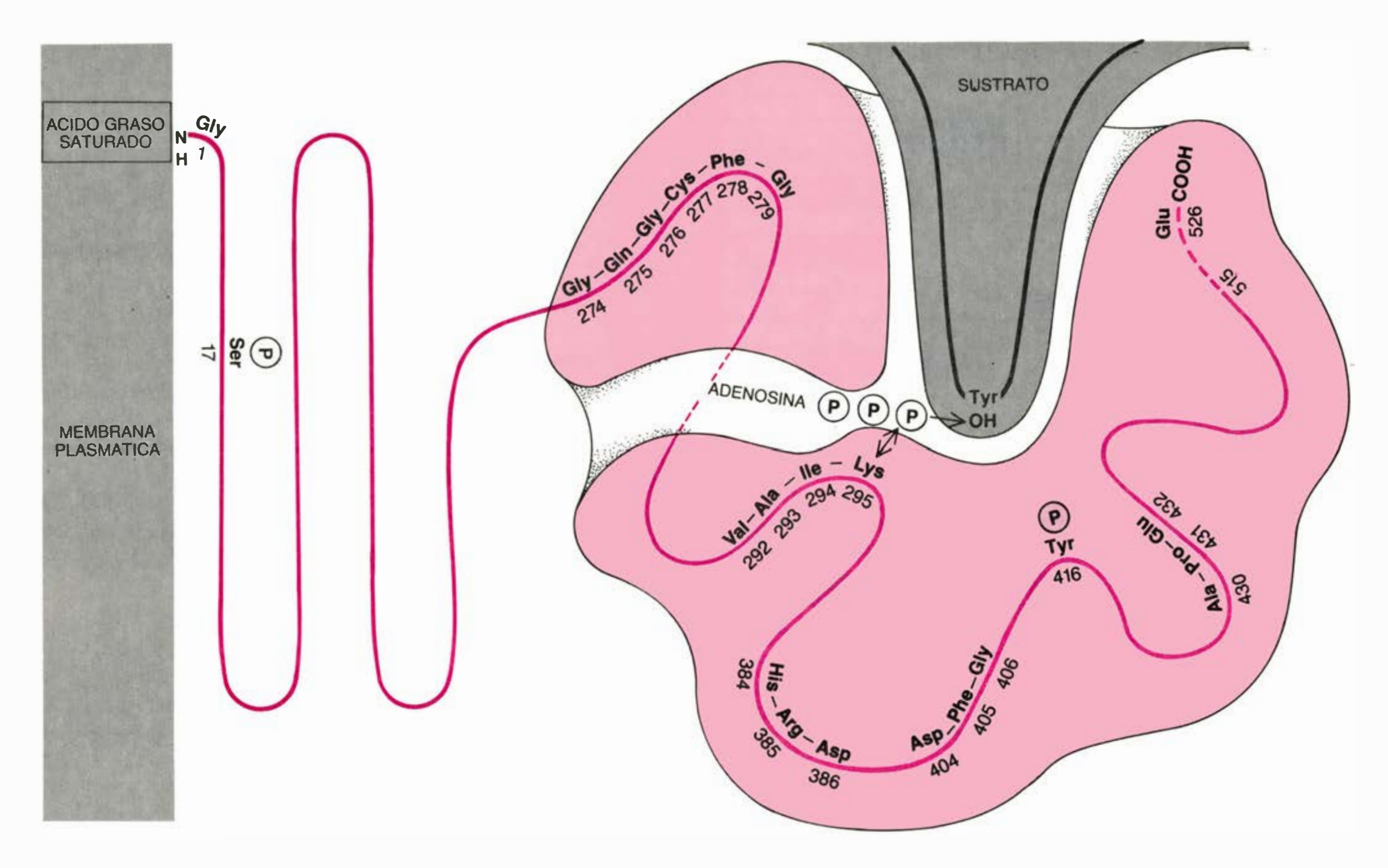
2. LAS ENZIMAS QUINASAS transfieren el tercer fosfato (*enmarcado en color*) del transportador de energía celular, trifosfato de adenosina (ATP), a una proteína, alterando con ello la actividad de dicha proteína. La mayoría de las quinasas fosforilan proteínas, bien en el aminoácido serina o bien en treonina, ya que éstos tienen un grupo hidroxilo (OH) en su cadena lateral (*enmarcados en gris*). Las enzimas determinadas por oncogenes como *src* fosforilan tirosinas, un tercer aminoácido que lleva también un grupo hidroxilo. El esquema muestra la reacción catalizada por una quinasa: ATP más uno de los tres aminoácidos da lugar al correspondiente aminoácido fosforilado más difosfato de adenosina (ADP).

El hallazgo de que p60*src* y su análogo en células normales desarrollaban actividades enzimáticas similares ilustraba un principio importante: la proteína determinada por un oncogén retrovírico ejerce, casi invariablemente, una función similar a la de su réplica celular, por lo que probablemente funcione imitando a la proteína normal. La fidelidad con que p60*src* imitase a su homóloga normal debería ser una pista importante para dilucidar si estábamos ante una proteína celular inalterada (presente quizás en cantidades anormalmente altas) o si, por el contrario, había sufrido un cambio significativo y actuaba de forma diferente. Posteriormente volveremos sobre ello.

Una célula cancerosa se distingue en muchos aspectos de una célula normal del mismo tipo. ¿Cómo explicar que la fosforilación de algunas tirosinas en ciertas proteínas de la célula desencadenen la serie de efectos que caracterizan a la transformación? En principio, p60*src* podría alterar la función de un grupo concreto de proteínas, añadiéndoles grupos fosfatos: la compleja naturaleza del estado maligno deberíase, entonces, a la presencia de proteínas susceptibles de ser modificadas a lo largo de toda una serie de rutas metabólicas celulares. ¿Qué papel corresponde en concreto a la fosforilación de la tirosina? Como posteriormente veremos, hay razones para pensar que la fosforilación de la tirosina puede ser uno de los mecanismos implicados en los complejos sistemas reguladores que controlan la forma y el crecimiento celular. Pequeñas alteraciones de esos sistemas pueden llevar al estado canceroso. Queda por aclarar, sin embargo, por qué la fosforilación de la serina o treonina no tiene efectos similares.

La región quinasa

En todas las proteínas oncogénicas conocidas se ha determinado la actividad quinasa específica de tirosina. Seis de ellas, además de p60*src*, poseen dicha propiedad enzimática (los productos de los oncogenes *yes, fgr, abl, fps, fes* y *ros*); los demás no muestran actividad quinasa detectable. Las técnicas de clonación molecular han permitido determinar la secuencia nucleotídica de casi todos los oncogenes



3. PROTEINA DETERMINADA POR EL ONCOGEN *src*. Se trata de una quinasa formada por 526 aminoácidos, denominada p60*src* por tener un peso molecular de 60.000 dalton. El dibujo muestra la cadena proteínica (*línea de color*) anclándose por su extremo amino (NH_2) en la membrana plasmática de una célula, e ilustra la región enzimática, de estructura globular, con el ATP en posición de ceder su tercer fosfato (*P*) a una tirosina de la proteína sustrato. Se cree que la lisina de la posición 295, un aminoácido cargado positivamente, resulta atraída hacia el tercer fosfato, cargado negativamente. Los aminoácidos señalados son básicamente los mismos en las regiones homólogas de p60*src* y otras seis quinasas determinadas por oncogenes. Hay una diferencia importante entre p60*src* y su réplica normal: la secuencia de aminoácidos que va desde la posición 515 hasta el extremo carboxilo (COOH) está remplazada por una secuencia diferente, de 19 aminoácidos, en la proteína normal; lo cual explicaría, según se cree ahora, su distinto comportamiento.

víricos y, a partir de ésta, utilizando la clave genética, se ha predicho la secuencia de aminoácidos de sus proteínas. El cotejo de las secuencias saca a luz interesantes parecidos. En p60*src*, la región quinasa, que cataliza la transferencia de los grupos fosfato, está formada por un segmento de unos 250 aminoácidos, situados en uno de los extremos de la proteína. En las otras seis proteínas oncogénicas con actividad quinasa específica de tirosina se han encontrado regiones similares y de pareja longitud.

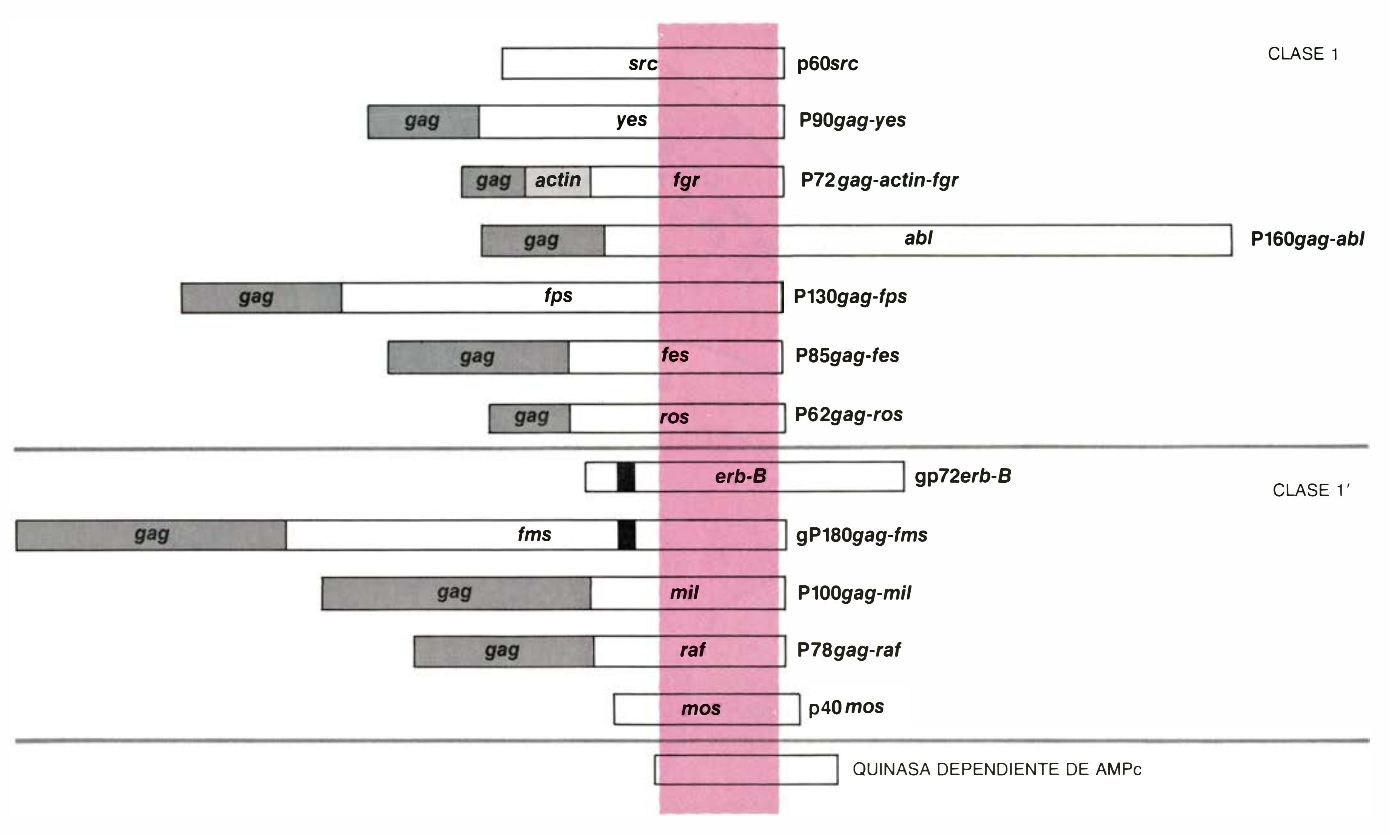
La estrecha homología entre las regiones catalíticas de este grupo de enzimas sugiere la existencia de un antecesor evolutivo común. Una amplia búsqueda, por ordenador, de homologías entre la secuencia de aminoácidos de p60*src* y las de todas las proteínas que se tienen archivadas permitió encontrar más secuencias parecidas, prueba de que las regiones forman parte de una familia mayor. Así, la única quinasa específica de serina cuya secuencia se conoce (una quinasa dependiente de AMP cíclico), es parecida a p60*src*. En otras palabras, puede haber no ya una familia de quinasas de tirosinas, sino una superfamilia que cobije a todas las quinasas, determinadas por genes descendientes de uno ancestral único.

Al examinarse otras secuencias de proteínas oncogénicas, amén de las siete dotadas de probada actividad quinasa, se encontraron otras cinco que ofrecían gran homología con la región responsable de la actividad quinasa específica de tirosina. El significado de tal parentesco no es muy claro, aunque suponemos que esas proteínas (los productos de los oncogenes *erb-B, fms, raf, mil* y *mos*) tienen, hasta cierto punto, funciones similares a la de las quinasas. Hay ya pruebas experimentales de que la proteína *erb-B* es capaz de fosforilar proteínas, concretamente en residuos de tirosina.

Adelanté ya que la fosforilación de las tirosinas constituía un hecho raro en células normales. Tan sólo una de cada 2000 moléculas de fosfato ligadas a proteínas corresponden a fosfotirosinas. (Un 90 por ciento del fosfato está unido a serina y un 10 por ciento a treonina.) En células transformadas por virus que llevan oncogenes cuyos productos proteínicos poseen actividad quinasa específica de tirosina se aprecia una decuplicación del nivel de fosfotirosinas, señal de que el comportamiento de las proteínas oncogénicas in vitro es reflejo de lo que ocurre en las células vivas. Si suponemos que la fosforilación de proteínas celulares en sus residuos de tirosina forma parte del mecanismo de transformación celular por virus, resulta palmaria la necesidad de identificar las proteínas "diana", sobre las que actúan las quinasas, para conocerlo.

Proteínas diana

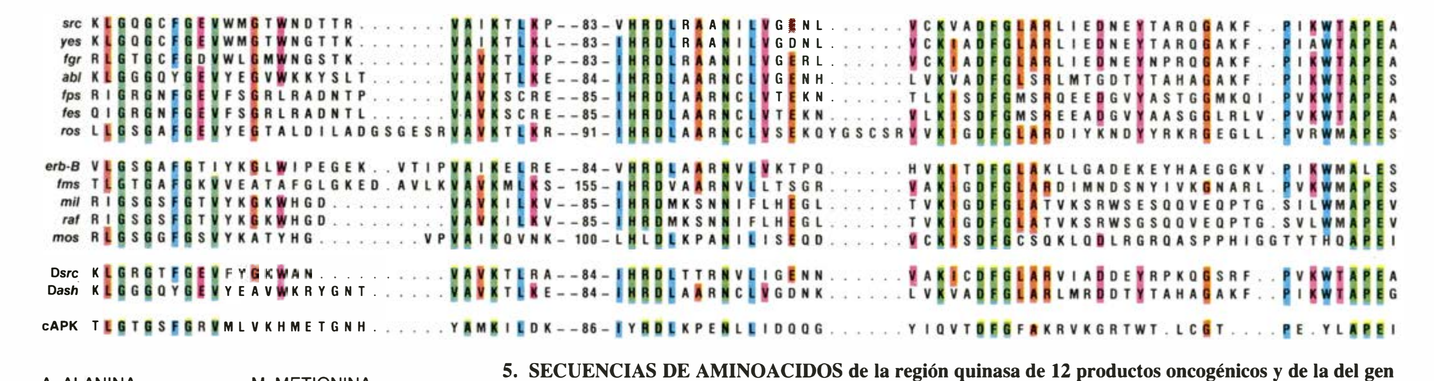
¿Qué proteínas de las células infectadas por retrovirus contienen fosfotirosina? Jonathan A. Cooper, Sefton y el autor utilizaron dos estrategias diferentes para identificarlas. La primera de ellas consistió en buscar proteínas con una función específica, cuya alteración explicara alguna propiedad de las células malignas. En este orden, la morfología de una célula transformada por un virus cancerígeno difiere notablemente de la que presenta otra libre de tal ataque; ello sugiere que se ha alterado el citoesqueleto, o armazón interno, de la célula. En la pasada década se han purificado varias proteínas que forman



4. ESTRUCTURAS de dos grupos de proteínas oncogénicas víricas y de una quinasa específica de serina normal (*abajo*). La longitud de las barras es proporcional al número de aminoácidos de cada proteína. El extremo NH_2 de cada cadena se sitúa a la izquierda. Los productos de la Clase 1 poseen una clara actividad quinasa específica de tirosina, no así los productos de la Clase 1′. Del análisis de la secuencia de aminoácidos de las proteínas (deducido de la secuencia de nucleótidos de su ADN) se desprende que comparten una misma región de 250 aminoácidos, parecidos a los que forman la región quinasa de p60*src* (*color*). En la mayoría de los casos, parte de la proteína determinada por el gen vírico *gag* se sintetiza con la proteína oncogénica como un único producto. Dos proteínas que atraviesan la membrana y se exponen al exterior tienen en común la región que se introduce en la membrana (*negro*).

parte del citoesqueleto. ¿Es alguna de ellas sustrato de la quinasa de tirosina? Con S. Jonathan Singer, de la Universidad de California en San Diego, aislamos diez proteínas citoesqueléticas de células infectadas con RSV. Sólo la proteína denominada vinculina contenía algo de fosfotirosina. Aunque la vinculina de células normales contenía también algo de fosfotirosina, en las células transformadas la fosforilación se multiplicaba por veinte.

La vinculina se localiza en las placas adhesivas, pequeñas "ventosas" situadas en la parte inferior de la célula que se adhieren fuertemente a la superficie donde se cultivan. En el interior de éstas, se entrecruzan unos haces de filamentos citoesqueléticos formados por la proteína actina, haces que acaban finalmente en las placas adhesivas. La vinculina se interpone entre la membrana plasmática celular y los extremos de los haces de actina; probablemente conecta los haces a una hipotética proteína de anclaje sita en la membrana. Larry R. Rohrschneider, del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson de Seattle, encontró que p60*src* se localizaba en las placas adhesivas, junto a la vinculina fosforilada. El notable incremento en la fosforilación de las tirosinas de la vinculina de células transformadas puede debilitar su fuerza como elemento conector, liberando los filamentos de actina, muy desorganiza-



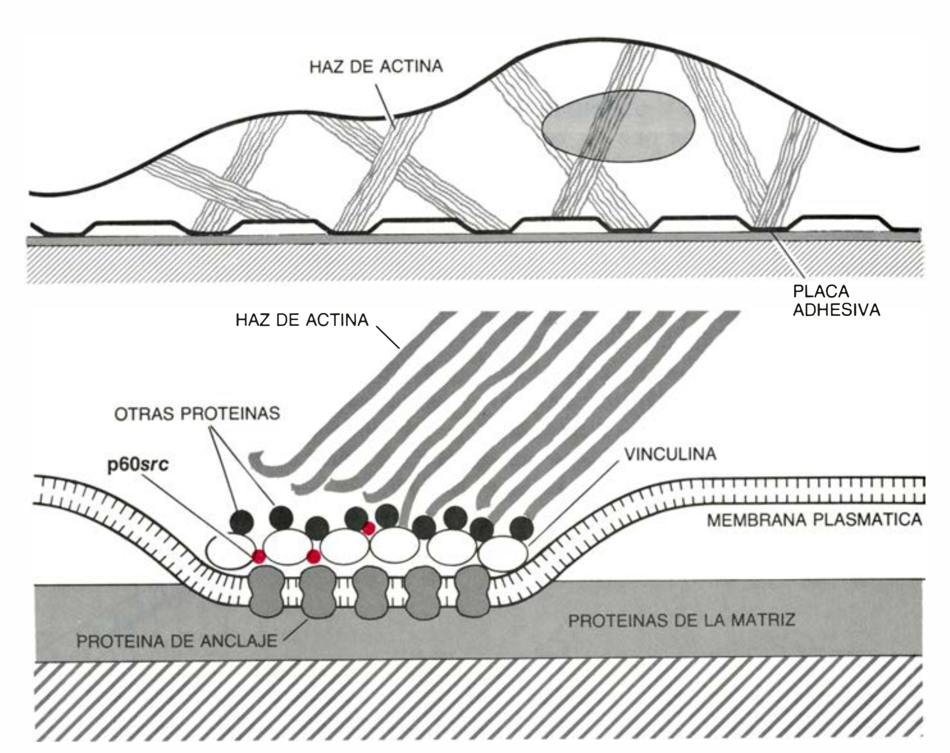
A ALANINA
C CISTEINA
D ACIDO ASPARTICO
E ACIDO GLUTAMICO
F FENILALANINA
G GLICINA
H HISTIDINA
I ISOLEUCINA
K LISINA
L LEUCINA
M METIONINA
N ASPARAGINA
P PROLINA
Q GLUTAMINA
R ARGININA
S SERINA
T TREONINA
V VALINA
W TRIPTOFANO
Y TIROSINA

5. SECUENCIAS DE AMINOACIDOS de la región quinasa de 12 productos oncogénicos y de la del gen *src* de *Drosophila*, la mosca del vinagre, una "región de homología *abl-src*" (*ash*), del genoma de *Drosophila*, y la quinasa dependiente de AMP-cíclico. Se han colocado de forma que destaquen sus homologías. Los aminoácidos se representan por un código de una letra (*izquierda*). Se ha omitido un segmento central de cada secuencia, indicándose el número de subunidades omitidas en cada caso. Cada punto representa un "agujero" de un aminoácido, introducido para conseguir un mejor alineamiento. Las barras de color simbolizan el grado de similitud de las posiciones mejor conservadas. Una barra verde significa que el mismo aminoácido aparece en una posición determinada en 14 o 15 de las 15 proteínas; una barra azul indica la existencia de 12 o 13 identidades; naranja 10 o 11 y, roja, ocho o nueve coincidencias.

dos de hecho en las células transformadas. Algunos descubrimientos recientes de Rohrschneider sugieren, sin embargo, que la fosforilación de la vinculina, por sí sola, quizá no baste para provocar tal desorganización. Tal vez se precise la fosforilación de otras proteínas de las placas adhesivas.

Se caracterizan también las células tumorales por su tendencia a excretar gran cantidad de ácido láctico, como consecuencia del aumento en el consumo de glucosa vía glucólisis, una ruta anaeróbica con once etapas enzimáticas secuenciales. En las células transformadas por RSV se aviva la actividad de varias de las enzimas glucolíticas, lo que apunta hacia una posible fosforilación de esas enzimas por p60*src*. En colaboración con Robert J. Schwartz y Nachum A. Reiss, de la Universidad Baylor, Cooper y el autor aislaron ocho enzimas glucolíticas de las células transformadas. Tres de ellas contenían fosfotirosina: enolasa, mutasa del fosfoglicerato y deshidrogenasa del lactato. Sin embargo, sólo una pequeña fracción de las moléculas de enzima poseía una tirosina fosforilada. Además, ninguna de esas enzimas constituía un factor limitante en la glucólisis. La enzima clave del proceso, la fosfofructoquinasa, no parecía tener tirosinas fosforiladas. Pensamos, por tanto, que la fosforilación de las tirosinas en las tres enzimas mencionadas no debe intervenir de una forma decisiva en el incremento global de la glucolisis; antes bien, reflejan una pérdida de especificidad en la fosforilación, consecuencia del exceso de p60*src* en la célula. El incremento de la glucólisis, no sólo en células transformadas por RSV, sino también en otras células tumorales, puede explicarse por causas más generales que la fosforilación que produce p60*src*. Verbigracia, por un aumento en el suministro de glucosa, que incorporan más rápidamente las células tumorales que las demás.

Vayamos con la segunda estrategia que seguimos para identificar la proteína diana; carecía de prejuicios en lo concerniente al tipo de proteínas que debían estar fosforiladas en las células tumorales. Cultivamos células normales y transformadas por virus en presencia de fosfato marcado con fósforo radiactivo y extendimos sus proteínas en un gel, según un método desarrollado por Patrick H. O'Farrell, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco. La técnica permite separar proteínas en una dimensión, en virtud de su carga eléctrica, y en otra en razón del tamaño. El medio millar aproximado de fosfoproteínas celulares se marcan por incorporación del fosfato radiactivo y sus manchas oscuras se detectan en una autorradiografía, tras la exposición de una película de rayos X al gel.



6. PLACAS ADHESIVAS, estructuras que permiten que las células se adhieran a las superficies, además de servir como sitios internos de anclaje de los haces de filamentos de actina (*arriba*). La proteína vinculina se localiza en las placas adhesivas, conectando los haces de actina con una proteína de anclaje (*abajo*). En células transformadas por el virus del sarcoma de Rous también se detecta p60*src* (*color*) en las placas adhesivas, encontrándose vinculina con fosfotirosina. La fosforilación por p60*src* puede desorganizar esta estructura (*izquierda*); contribuye así al desorden propio de los haces de actina de las células malignas.

Para distinguir del conjunto de fosfoproteínas las contadas proteínas que poseían tirosinas fosforiladas utilizamos un álcali fuerte que tendía a romper enlaces entre fosfato y serina, pero no entre fosfato y treonina o tirosina. Al sumergir el gel en álcali, antes de realizar la autorradiografía, se liberaban los fosfatos marcados de muchas de las proteínas que portaban fosfoserina, rindiendo una distribución de proteínas resistentes al álcali mucho más manejable. Algunas de ellas abundan copiosamente en células transformadas por virus. El análisis de esas proteínas permite comprobar que algunas de ellas contienen fosfotirosina.

Función de p36

Una de las proteínas que contiene fosfotirosina y que destaca en los geles es la conocida como p36 (por tener un peso molecular de 36.000 dalton). La detectaron G. Steven Martin y Kathryn Radke, de la Universidad de California en Berkeley, en fibroblastos (células del tejido conectivo) de embrión de pollo transformadas por RSV; parece ser el principal sustrato de todas las quinasas víricas. (Como ocurre con los sustratos donde se fosforilan tirosinas, sólo se fosforila una determinada tirosina de las muchas que tiene la proteína.)

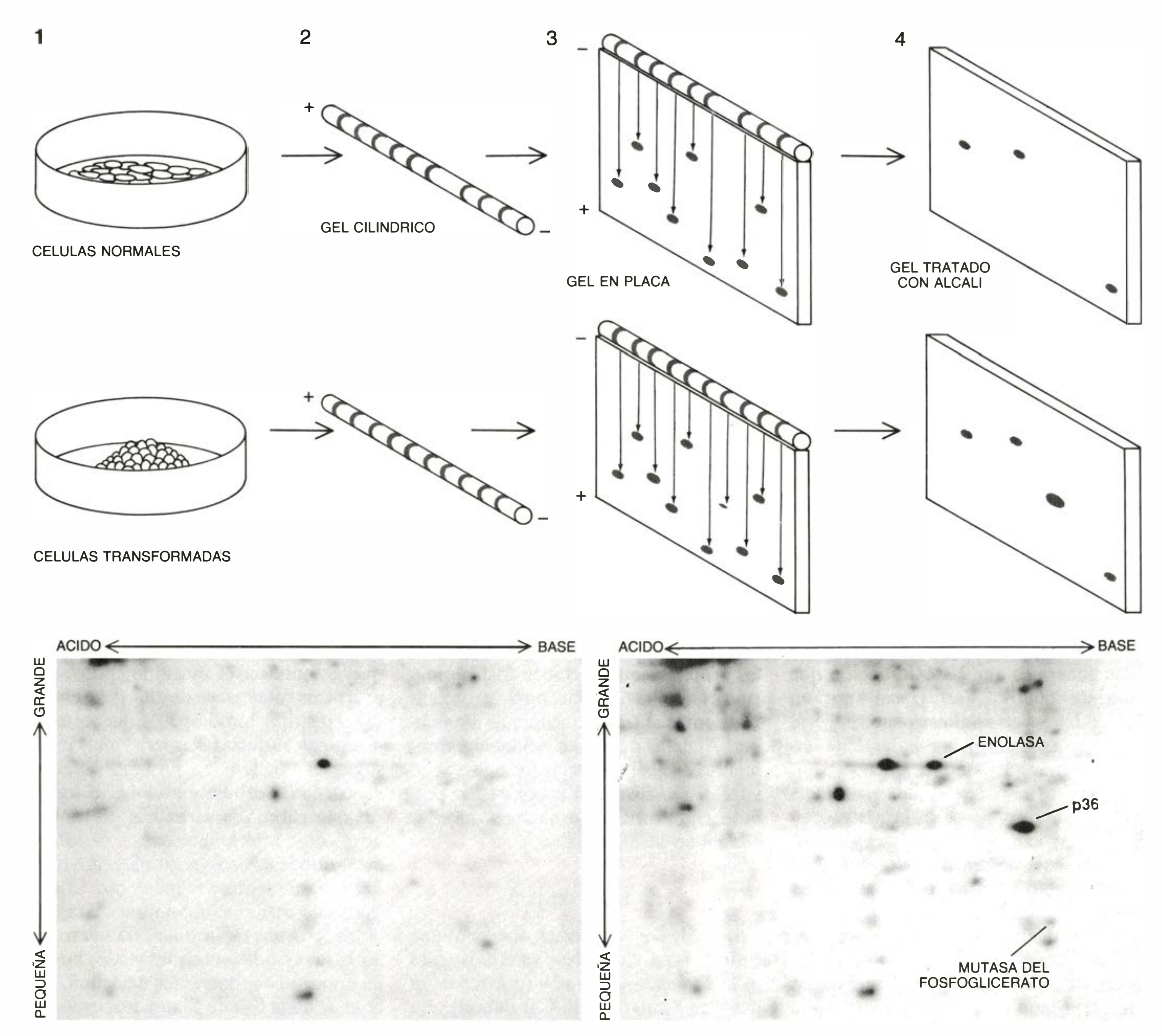
La función de p36 en las células sigue envuelta en el misterio. Desgraciadamente, no se puede asignar una función a una proteína apoyados sólo en su tamaño y carga. Lo que se sabe es que p36 está asociada con la parte interna de la membrana plasmática de muchos tipos de células cultivadas, aunque no se encuentra en todos los tipos celulares del cuerpo. Kathleen L. Gould y el autor han encontrado, por ejemplo, que abunda en el intestino, pero que prácticamente carece de ella el cerebro.

La distribución de p36 en las células intestinales quizás ofrezca una pista sobre su función. La proteína se concentra en las células epiteliales cilíndricas que cubren la superficie de las vellosidades, prolongaciones digitiformes, dispuestas sobre los plegamientos del revestimiento del intestino. El extremo de una célula cilíndrica está cubierto por una "escobilla" de microvellosidades, cada una de las cuales posee un armazón de filamentos de actina. La base de cada haz de filamentos está anclada en una estructura filamentosa transversal denominada velo terminal; p36 se encuentra fundamentalmente en el velo terminal, lo que sugiere que la proteína pudiera desempeñar una función estructural. Y cumplir, en otros tipos celulares, un papel similar en estructuras esqueléticas situadas dentro

de la membrana plasmática. Normalmente, las membranas de las células transformadas por RSV presentan una morfología más rizada que las células normales, amén de otras alteraciones. La fosforilación de p36 podría ser responsable de tales cambios.

La cantidad total de fosfotirosina de una célula transformada por RSV es mayor que la suma de las cantidades presentes en las proteínas diana identificadas hasta ahora, lo que significa que aún quedan por descubrir otros sustratos de p60*src*. Pero llegados aquí sí nos es dado formular dos preguntas de interés. Primera: ¿qué proteínas portan fosfotirosina en células transformadas por otros oncogenes que no sean *src*? Aquellas proteínas diana que sean comunes a muchas quinasas transformantes pueden ser las más importantes para la transformación. Segunda, ¿qué proteínas de las identificadas en las células transformadas tienen también fosforiladas las tirosinas en células normales? Ello nos puede informar de si las quinasas específicas de tirosina víricas causan o no su efecto porque fosforilan sustratos inapropiados.

Al comparar células transformadas por los virus portadores de los oncogenes *src, yes, fgr, abl, fps* y *fes*, encontramos que en todos ellos está fosforilado el mismo espectro de proteínas, vinculina, p36 y las tres enzimas glucolíticas incluidas. Lo que no debe sorprendernos, si atendemos al posible antecesor común de las regiones catalíticas de las seis quinasas; antes bien, ello refuerza la idea de que los virus de este grupo transforman células utilizando un mecanismo común que implica fosforilación de tirosinas. No se descarta, empero, que las proteínas transformantes de estos virus realicen otras actividades tan críticas para la transformación como la fosforilación de proteínas. Erikson, Lewis C. Cantley, Jr., y sus



7. ANALISIS BIDIMENSIONAL EN GEL para identificar proteínas con fosfotirosinas en células transformadas. Se cultivan células normales y transformadas en presencia de fosfato marcado con fósforo radiactivo (*1*). Las proteínas marcadas se separan de acuerdo con su carga en un gel cilíndrico, situado en un campo eléctrico (*2*). Se sumerge el gel en detergente cargado negativamente, que se une a las proteínas (*bandas grises*) en proporción a su peso. A continuación, el gel cilíndrico se sitúa sobre un gel en placa, sometiéndolo a un campo eléctrico. Las proteínas emigran así hacia el polo positivo a una velocidad proporcional a su peso (*3*). Para enriquecer el gel en proteínas que contengan fosfotirosinas se le sumerge en álcali, que elimina el marcaje de muchas de las proteínas portadoras de fosfoserina; se observan fosfoproteínas específicas de las células transformadas (*4*). La película de rayos X (*abajo*) expuesta sobre el gel presenta unas manchas que corresponden a las fosfoproteínas de las células normales (*izquierda*) y transformadas por RSV (*derecha*) resistentes al álcali. Algunas de esas proteínas están fosforiladas en tirosina y, de éstas, las hay que sólo se distinguen en las células transformadas.

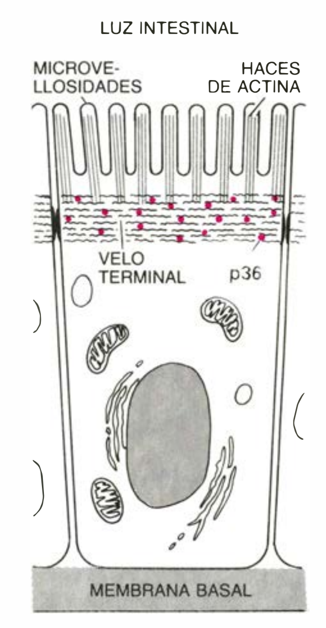
colegas, de la Universidad de Harvard, acaban de ver que p60*src* puede fosforilar el lípido fosfatidil-inositol, uno de los componentes principales de la membrana plasmática. Se supone que la fosforilación acelera la descomposición del fosfatidil-inositol en diacilglicerol, que se sabe activa una quinasa específica de serina. Esta puede ser otra vía a través de la cual p60*src* altere la célula.

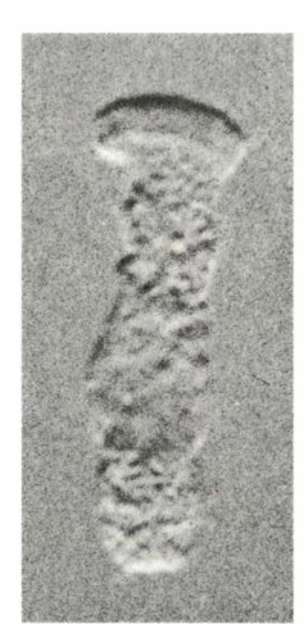
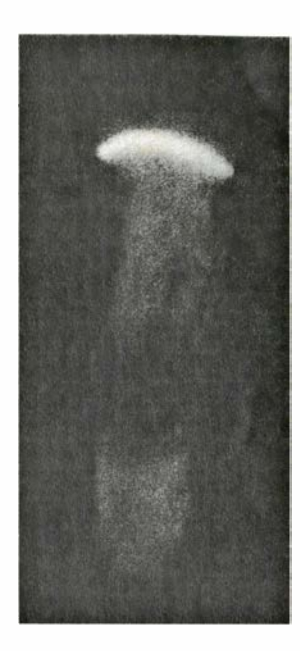
A excepción de la vinculina, las proteínas con tirosinas fosforiladas en células transformadas por RSV no presentan esa fosforilación, al menos en forma detectable, en células normales. Ello sugiere que p60*src*, por regla general, elige proteínas inapropiadas como sustrato, bien debido a su masiva presencia en células infectadas, bien por una diferencia estructural entre p60*src* y su réplica normal. De hecho hay una diferencia significativa en el extremo carboxilo, o COOH, de las dos proteínas. Se están realizando experimentos para probar si la diferencia tiene que ver con la capacidad transformante de p60*src*. Los primeros resultados así lo sugieren. Las restantes quinasas víricas específicas de tirosina están todavía más alteradas en comparación con sus réplicas celulares. Al menos para ese gran grupo de oncogenes víricos parece probable que las alteraciones de la estructura proteínica encierren un significado oncogénico.

Factores de crecimiento

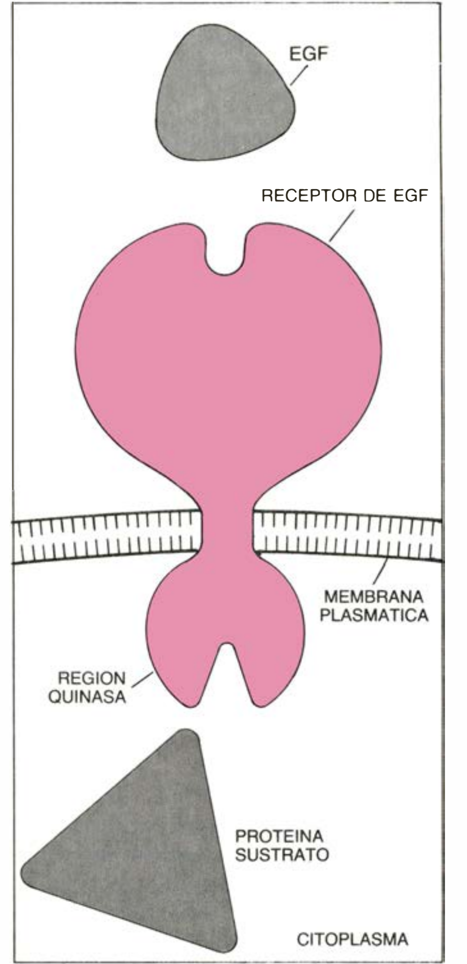
Quizá la propiedad más llamativa de las células cancerosas sea su incesante proliferación. Para ello deben ignorar los sistemas de control que impiden que las células normales se dividan demasiado a menudo o lo hagan indefinidamente. Algunos sistemas de control dependen de factores de crecimiento e inhibidores extracelulares que circulan en la sangre. En los últimos años se han aislado y caracterizado varios factores proteínicos de crecimiento. Dos de los más estudiados son el factor de crecimiento epidérmico (EGF) y el factor de crecimiento procedente de las plaquetas (PDGF), que envían su señal uniéndose a moléculas receptoras específicas situadas en la membrana plasmática de la célula. Cuando se añade cualquiera de ellos a un cultivo de células que no se estén dividiendo, se insta a éstas a dividirse una sola vez.

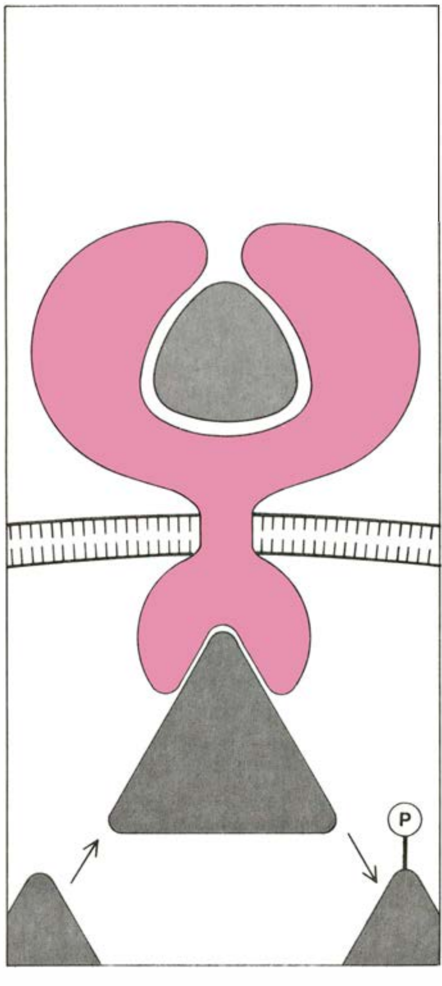
Stanley Cohen y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Vanderbilt, identificaron y purificaron el receptor del EGF, comprobando que presentaba actividad



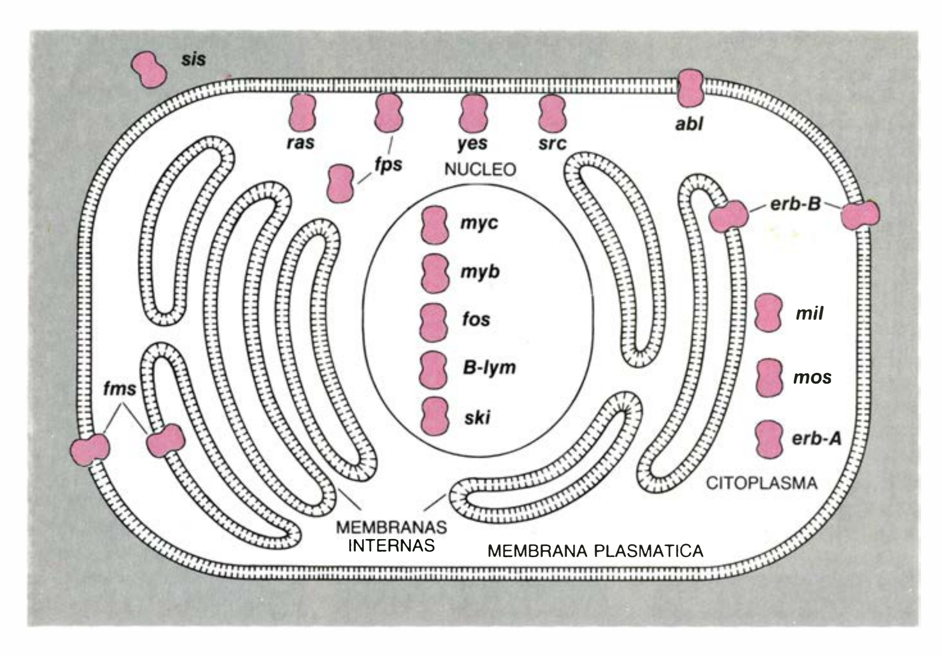



8. CELULAS EPITELIALES CILINDRICAS que cubren el revestimiento del intestino. La proteína p36, que contiene fosfotirosina (*color*), se concentra en el velo terminal donde se anclan los haces de actina de las microvellosidades. La localización de p36 en el velo terminal se observa claramente yuxtaponiendo las dos fotomicrografías de la misma célula epitelial de rata: una óptica (Normarski) y una micrografía de fluorescencia que indica el lugar donde los anticuerpos marcados se enlazan a p36 (*a la derecha*).





9. RECEPTOR para el factor de crecimiento epidérmico (EGF). Posee una región extracelular que se une al EGF y una región quinasa específica de tirosina (*izquierda*). Quizá la unión de una molécula de EGF cambie la conformación del receptor, instando a la región intracelular a catalizar la fosforilación de una proteína celular (*derecha*). Las quinasas determinadas por algunos oncogenes pueden realizar la misma actividad enzimática que el receptor, aunque sin recibir una señal adecuada por parte del EGF; lo que determina que la célula adquiera el crecimiento incontrolado característico de las células cancerosas.



10. SITIO DE ACCION de algunos productos oncogénicos conocidos. Se detectaron por medio de anticuerpos específicos de varias de las proteínas marcados con fluorescencia, o fraccionando las células en una centrífuga e identificando posteriormente las proteínas encontradas en cada una de las fracciones.

quinasa; sorprendentemente, la actividad es específica de tirosina y se estimula cuando una molécula de EGF se une al receptor. Acaba de demostrarse que esta molécula receptora posee una doble actividad: se une al EGF y fosforila tirosinas de proteínas celulares. El receptor es una proteína que atraviesa la membrana; la parte de la molécula que queda en el exterior celular reconoce al EGF, y la fosforilación corresponde a la región catalítica, situada en el interior de la célula. La unión con el EGF debe transmitir una señal, a través de la membrana, que incrementa la actividad quinasa de la región catalítica. Recientemente se ha demostrado que el receptor del PDGF posee una función enzimática similar; y entra dentro de lo posible que se trate de una propiedad general de los receptores de factores de crecimiento.

Cooper y el autor han observado que cuando se añade EGF o PDGF a células que llevan los receptores adecuados se registra un incremento del nivel de fosfotirosinas en las proteínas celulares. Lo que quiere decir que la señal para dividirse puede transmitirse desde el receptor, una vez ocupado, hasta el interior celular vía fosforilación de tirosina en una o varias proteínas del interior celular. Resulta significativo que un incremento de la fosforilación de la tirosina sea rasgo común compartido por las células normales expuestas a factores de crecimiento y por ciertas células transformadas por un virus. Quizá las quinasas determinadas por muchos oncogenes usurpen algún mecanismo de control del crecimiento celular, fosforilando una proteína que normalmente es reconocida por la quinasa de un receptor, e instando la división permanente de la célula infectada.

Los oncogenes *erb-B* y *sis*

La pregunta que surge inmediatamente es si la analogía funcional entre los receptores de los factores de crecimiento y las quinasas víricas se refleja en una homología estructural. Recientemente, un grupo encabezado por Michael D. Waterfield, de la Fundación Imperial para la Investigación del Cáncer de Londres, Joseph Schlessinger, del Instituto Weizmann de Ciencias, y Axel Ullrich, de Genentech, Inc., han encontrado que parte del receptor del EGF posee una secuencia de aminoácidos muy parecida al producto del oncogén *erb-B*. De hecho, la proteína *erb-B* parece la misma forma truncada del receptor del EGF: le falta la región de unión al EGF, aunque conserva el segmento que atraviesa la membrana y la región catalítica que se introduce en la célula.

Quizá la proteína *erb-B*, al parecer asociada con membranas celulares, mimetice la acción del receptor del EGF, haciéndolo, no obstante, sin estar sujeta a regulación. Que no se haya demostrado actividad fosforilante por parte de la proteína *erb-B* puede poner en cuestión esas hipótesis, aunque, gracias a los intensos trabajos en curso, tal vez se logre aún demostrar que el producto del oncogén es una quinasa.

La conexión entre control del crecimiento y transformación vírica confiere enorme interés a la identificación de las proteínas que se fosforilan con las quinasas de tirosinas de los receptores de factores de crecimiento. Cooper y el autor, junto con Russell Ross y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en Seattle, han identificado una proteína con fosfotirosina de un peso molecular de 42.000 dalton en células tratadas con EGF o PDGF. La proteína (p42) parece el principal sustrato del receptor de las quinasas; su fosforilación quizá constituya el primer paso del mecanismo encargado de enviar la señal de división a una célula normal. ¿Suplantan los virus ese primer paso en algunas células transformadas? Aunque no en todos, en ciertos tipos celulares transformados por oncogenes que determinan quinasas se han detectado p42 fosforiladas. Si, en ese nivel, las enzimas intervienen o no en algún mecanismo de control del crecimiento celular es algo que queda por demostrar.

Russell F. Doolittle, de la Universidad de California en San Diego, y Waterfield y sus colegas han publicado recientemente unos interesantes estudios que establecen otro tipo de relación entre las quinasas de los oncogenes víricos y las de los receptores de los factores de crecimiento. De forma independiente han observado que la proteína determinada por el oncogén *sis* del virus de sarcoma de mono es casi idéntica al PDGF. Al parecer, el gen proto-*sis* no es otro que el gen de PGDF. Lo que se desprende de este descubrimiento es que una célula infectada por virus de sarcoma de mono prolifera porque sintetiza y excreta un factor de crecimiento parecido al PGDF. Presumiblemente, tal factor de crecimiento suplanta al legítimo, interaccionando con los receptores celulares de PDFG y estimulando así la fosforilación de la tirosina. Mientras el PDGF real envía su señal sólo en los momentos oportunos, la proteína determinada por *sis* puede hacerlo continuamente. En apoyo de esa idea, Stuart A. Aaronson, del Instituto Nacional del Cáncer, y Thomas F. Deuel y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, han publicado, cada uno por su cuenta, pruebas de que células infectadas por virus de sarcoma de mono excretan un factor de crecimiento parecido al PDGF, responsable quizá de su crecimiento descontrolado. Cabría esperar en tales células un incremento de la fosforilación de tirosinas, pero hasta ahora no se ha detectado.

De las proteínas transformantes que no hemos hablado se conoce bastante menos, aunque hay ciertos descubri-

mientos interesantes sobre los productos de los oncogenes *ras* y *myc*.

El producto *ras*

La importancia de las proteínas *ras* reside en que se las ha considerado entre las causas de algunos cánceres humanos. Edward M. Scolnick y sus colegas, a la sazón en el Instituto Nacional del Cáncer, identificaron el producto del oncogén *ras* del virus de sarcoma de Harvey: una proteína con peso molecular de 21.000 dalton. Cuando Thomas Y. Shih y Scolnick ensayaron la actividad quinasa de p21*ras* encontraron que dicha proteína catalizaba su propia fosforilación (en treonina más que en tirosina), pero no podía fosforilar otras proteínas. Además, la reacción "autoquinasa" no dependía del ATP como donante de fosfato, sino que tomaba su fosfato de una molécula parecida, el trifosfato de guanosina (GTP).

Las proteínas p21*ras* determinadas por los oncogenes víricos *ras* son atípicas: ni la p21*ras* celular normal ni las proteínas determinadas por los oncogenes humanos *ras* poseen actividad autoquinasa. Sin embargo, al igual que las p21*ras* víricas, se unen fuertemente al GTP, formando un complejo estable. La proteína se localiza (al igual que p60*src* y otras quinasas determinadas por oncogenes) en la parte interna de la membrana plasmática. Se sabe que varias proteínas que se unen a GTP se asientan en el mismo lugar en células normales; al unirse a GTP cumplen misión de "factores de enganche" en sistemas que envían señales de hormonas, como la adrenalina, al interior de la célula. Scolnick y sus colegas acaban de descubrir que p21*ras*, al igual que los factores de enganche, descomponen GTP en difosfato de guanosina y fosfato. Esta función GTPasa se reduce cinco veces en el caso de las p21*ras* oncogénicas, lo que implica que la proteína alterada puede permanecer activa durante más tiempo. Resulta tentador especular con la posibilidad de que p21*ras* normal desempeñe funciones de factor de enganche y que la versión oncogénica mutante transmita una señal continua y no regulada.

Proteínas nucleares

Ninguna de las proteínas oncogénicas mencionadas actúa en el núcleo celular. Considerando el número de alteraciones de las células cancerosas que requieren cambios en la expresión de los genes se hubiera dicho que la mayoría de las proteínas transformantes habrían de encontrarse en el núcleo, donde pueden ejercer su efecto directamente sobre el material genético y su expresión. Probablemente algunas de las proteínas asociadas a membranas y citoplásmicas afecten de un modo indirecto al núcleo, interfiriendo quizás los mecanismos que suele utilizar la célula para responder a los estímulos externos. Se conoce, sin embargo, un pequeño grupo de proteínas transformantes nucleares. Se cuentan, entre ellas, los productos de los oncogenes *myc, myb* y *fos*.

En numerosos cánceres humanos se observa la expresión anormal del gen *myc* a raíz de una multiplicación (amplificación) génica o de una desregulación. Algunas células cancerosas presentan muchas copias del gen (que aparentemente es proto-oncogén, no una versión mutante) en vez de las dos que forman el complemento celular normal; estas células cancerosas fabrican cantidades anormalmente altas del producto proteínico de *myc*. (Parece que la multiplicación génica es un fenómeno común en células cancerosas. En una línea celular de tumor humano, el gen proto-*ras* está multiplicado treinta veces, y otra línea lleva muchas copias del gen proto-*abl*.)

En el cáncer de glándula linfoide, llamado linfoma de Burkitt, asistimos a una anormalidad diferente. En muchos casos, las células transformadas, un tipo de linfocito *B*, llevan una traslocación cromosómica: un segmento de ADN del extremo de un cromosoma se traspone y fusiona con el extremo de otro cromosoma. Así, el gen *myc*, se traspone junto a un gen que determina una molécula de anticuerpo. Los genes de anticuerpos son extraordinariamente activos en los linfocitos *B*. Como resultado de la traslocación se incrementa la expresión del gen *myc*, al verse sometido a la misma regulación que el gen del anticuerpo.

No se sabe mucho sobre la proteína determinada por el gen proto-*myc*. Cabe suponerla similar al producto del oncogén vírico *myc*, que tiene afinidad por el ADN y se encuentra en la matriz nuclear, una estructura esquelética presuntamente implicada en la replicación del ADN. Quizá lo que ocurra es que las proteínas *myc* determinen la replicación continua del ADN de las células afectadas. De acuerdo con esa idea, Philip Leder, Charles D. Stiles y sus colegas, de la Facultad de Medicina de Harvard, han demostrado recientemente que el producto del gen proto-*myc* aparece en las células en crecimiento instantes antes de que empiecen a duplicar su ADN. La presencia de grandes cantidades de la proteína

NOMBRE DEL ONCOGEN			PROTEINA ONCOGENICA		
	RETROVIRUS	TUMOR	LOCALIZACION CELULAR	FUNCION	CLASE
src	SARCOMA DE POLLO	—	MEMBRANA PLASMATICA	QUINASA ESPECIFICA DE TIROSINA	CLASE 1 (QUINASAS DE TIROSINA CITOPLASMICAS)
yes	SARCOMA DE POLLO	—	MEMBRANA PLASMATICA (?)		
fgr	SARCOMA DE GATO	—	(?)		
abl	LEUCEMIA DE RATON	LEUCEMIA HUMANA	MEMBRANA PLASMATICA		
fps	SARCOMA DE POLLO	—	CITOPLASMA (¿MEMBRANA PLASMATICA?)		
fes	SARCOMA DE GATO	—	CITOPLASMA (¿CITOESQUELETO?)		
ros	SARCOMA DE POLLO	—	(?)		
erb-B	LEUCEMIA DE POLLO	—	MEMBRANAS PLASMATICA Y CITOPLASMICA	REGION QUINASA CITOPLASMICA ESPECIFICA DE TIROSINA DEL RECEPTOR DE EGF	CLASE 1′ (QUINASAS POTENCIALES)
fms	SARCOMA DE GATO	—	MEMBRANAS PLASMATICA Y CITOPLASMICA	REGION CITOPLASMICA DE UN RECEPTOR DE FACTOR DE CRECIMIENTO (?)	
mil	CARCINOMA DE POLLO	—	CITOPLASMA	(?)	
raf	SARCOMA DE RATON	—	CITOPLASMA	(?)	
mos	SARCOMA DE RATON	LEUCEMIA DE RATON	CITOPLASMA	(?)	
sis	SARCOMA DE MONO	—	EXCRETADA	FACTOR DE CRECIMIENTO PARECIDO A PDGF	CLASE 2 (FACTORES DE CRECIMIENTO)
Ha-ras	SARCOMA DE RATA	CARCINOMA HUMANO, CARCINOMA DE RATA	MEMBRANA PLASMATICA	UNION AL GTP	CLASE 3 (CITOPLASMICA, UNION AL GTP)
Ki-ras	SARCOMA DE RATA	CARCINOMA, LEUCEMIA Y SARCOMA HUMANOS	MEMBRANA PLASMATICA		
N-ras	—	LEUCEMIA Y CARCINOMA HUMANOS	MEMBRANA PLASMATICA		
fos	SARCOMA DE RATON	—	NUCLEO	(?)	CLASE 4 (NUCLEAR)
myc	LEUCEMIA DE POLLO	LINFOMA HUMANO	NUCLEO	UNION AL ADN	
myb	LEUCEMIA DE POLLO	LEUCEMIA HUMANA	NUCLEO	(?)	
B-lym	—	LINFOMA DE POLLO, LINFOMA HUMANO	NUCLEO (?)	(?)	
ski	SARCOMA DE POLLO	—	NUCLEO (?)	(?)	
rel	LEUCEMIA DE PAVO	—	(?)	(?)	SIN CLASIFICAR
erb-A	LEUCEMIA DE POLLO	—	(?)	(?)	
ets	LEUCEMIA DE POLLO	—	(?)	(?)	

11. PROTEINAS de oncogenes conocidos. La segunda columna recoge el tipo de animal a partir del cual se aisló el correspondiente oncogén vírico por primera vez (generalmente el hospedador normal) y el tipo de cáncer inducido. Algunos oncogenes designados por diferentes nombres (verbigracia, *fps* y *fes*) pudieran ser genes equivalentes en aves y mamíferos. La tercera columna contiene una relación de tumores humanos y de otros animales no producidos por virus, y en los que se ha podido identificar un oncogén (*ras*), un caso de amplificación génica o un proto-oncogén que se expresa inadecuadamente.

proto-*myc* en una célula pudiera conferirle inmortalidad, al hacer que se replique indefinidamente, en contraste con lo que es propio de las células normales, que tienen una capacidad finita de dividirse.

La inmortalización, por sí sola, no convierte necesariamente una célula normal en cancerosa. Para alcanzar todas las características del estado canceroso pudiera requerirse la activación de un segundo oncogén, un suceso que por sí solo no inmortalizaría las células. El grupo de Weinberg, en el MIT, y H Earl Ruley, del Laboratorio de Cold Spring Harbor, ha demostrado que las células extraídas directamente de animales y cultivadas no se transforman cuando se les introduce un solo oncogén, en contraste con lo que ocurre con las líneas "establecidas", mantenidas durante largo tiempo en un medio de cultivo. No obstante, ciertas parejas de oncogenes, por ejemplo *myc* y *ras*, pueden, según parece, cooperar en la transformación de tales células. Estudios epidemiológicos y de células cancerosas han dejado bien claro que la carcinogénesis es un proceso complejo en el que se suceden muchas etapas, lo que ha quedado confirmado ahora en el plano molecular.

Las investigaciones sobre el cáncer están en un momento álgido. Se han identificado genes que producen cáncer y empezamos a vislumbrar los mecanismos que utilizan los productos de esos genes para transformar las células en cancerosas. Los productos de los proto-oncogenes, origen de los oncogenes, parecen desempeñar papeles cruciales en el control del crecimiento y diferenciación celular, así como en el desarrollo embrionario. Quizá las proteínas transformantes deban sus profundos efectos a la perturbación de esos procesos celulares fundamentales. Aunque el producto de un oncogén y el de su correspondiente proto-oncogén son, en muchos casos, esencialmente iguales, nos es dado distinguir, a menudo, sus respectivas proteínas. Ello permitirá que algún día se desarrollen aproximaciones racionales a la terapia del cáncer basadas en un conocimiento detallado de la estructura y función de las proteínas oncogénicas.

El Templo Mayor de Tenochtitlán

Este lugar de culto para los aztecas fue descrito y destruido por los españoles. Los hallazgos fortuitos de sus desaparecidos restos han conducido a realizar una excavación exhaustiva de los mismos en el corazón de la ciudad de México

Eduardo Matos Moctezuma

En la noche del 21 de febrero de 1978, unos obreros de la compañía de electricidad de la ciudad de México estaban abriendo un socavón en la confluencia de las calles Guatemala y Argentina, en el corazón de la ciudad. A una profundidad de dos metros bajo el nivel de la calle encontraron piedra dura que les impidió seguir cavando. Al apartar la tierra que cubría la piedra y observar que ésta tenía relieves esculpidos suspendieron temporalmente el trabajo.

Una llamada a la Oficina de Salvamento Arqueológico del Instituto Nacional de Antropología e Historia hizo que un equipo de arqueólogos fuera enviado al lugar del hallazgo. Estos comprobaron que el objeto descubierto era un bajorrelieve en el que se veía una cara de perfil con adornos sobre la cabeza. Las labores de rescate continuaron bajo la dirección de los arqueólogos hasta el día 27 de febrero. Se descubrió un enorme disco de piedra de 3 metros y 25 centímetros de diámetro. En la cara superior del disco estaba esculpida la representación de una deidad femenina: desnuda, decapitada y con los brazos y piernas separados del torso. Sin duda se trataba de Coyolxauhqui, hermana del dios azteca Huitzilopochtli, una deidad lunar, muerta y desmembrada por su hermano después de una batalla que tuvo lugar en el cerro de Coatepec.

El fortuito descubrimiento renovó el interés por excavar el antiguo Templo Mayor de los mexicas: los habitantes de la ciudad azteca de Tenochtitlán. Algunas partes del templo ya eran conocidas. La esquina suroccidental fue descubierta por Manuel Gamio entre los años 1913 y 1914 (excavada posteriormente por Hugo Moedano y Elma Estrada en 1948). Poco después, en 1933, Emilio Cuevas había descubierto parte del muro y una pequeña sección de las escaleras de la plataforma que sustentaba las estructuras edificadas en una de las últimas épocas de construcción del Templo Mayor. La monumental escultura de Coyolxauhqui formaba parte del mismo templo, y cualquier intento de excavarlo completamente debía tener en cuenta las construcciones modernas que rodean el lugar. Fue entonces cuando mis colegas del Instituto Nacional de Antropología e Historia y yo comenzamos a plantear tres fases de investigación.

La primera fase consistió en reunir toda la información disponible tanto de carácter arqueológico como histórico. Teníamos los datos de las excavaciones realizadas con anterioridad en el área del templo, que se remontaban hasta 1790, cuando se descubrieron la famosa Piedra Calendario y la monumental escultura de Coatlícue. Disponíamos, asimismo, de las narraciones, del siglo XVI, que hicieron Bernal Díaz del Castillo y Hernán Cortés, que vieron el Templo Mayor y lo describieron, y los escritos posteriores de fray Bernardino de Sahagún, fray Diego Durán, Hernando Alvarado Tezozomoc y otros.

Las fuentes escritas nos informaban de que el Templo Mayor era una gran plataforma de cuatro o cinco niveles escalonados, orientada hacia el oeste, con dos escaleras que ascendían hasta el nivel más alto. Sobre la plataforma había dos estructuras: el santuario de Tlaloc (el dios del agua, de la lluvia y la fertilidad) y el de Huitzilopochtli (dios de la guerra y del sol). La preeminencia de estas dos deidades refleja las necesidades fundamentales de los mexicas: su economía se basaba en la producción agrícola (de aquí la importancia del agua y la lluvia) y en la recaudación del tributo impuesto a los pueblos conquistados (de aquí la importancia de la guerra). Esperábamos, pues, que todos los elementos asociados con el Templo Mayor, tales como ofrendas y esculturas, estuvieran relacionados de alguna forma con estos dos aspectos fundamentales.

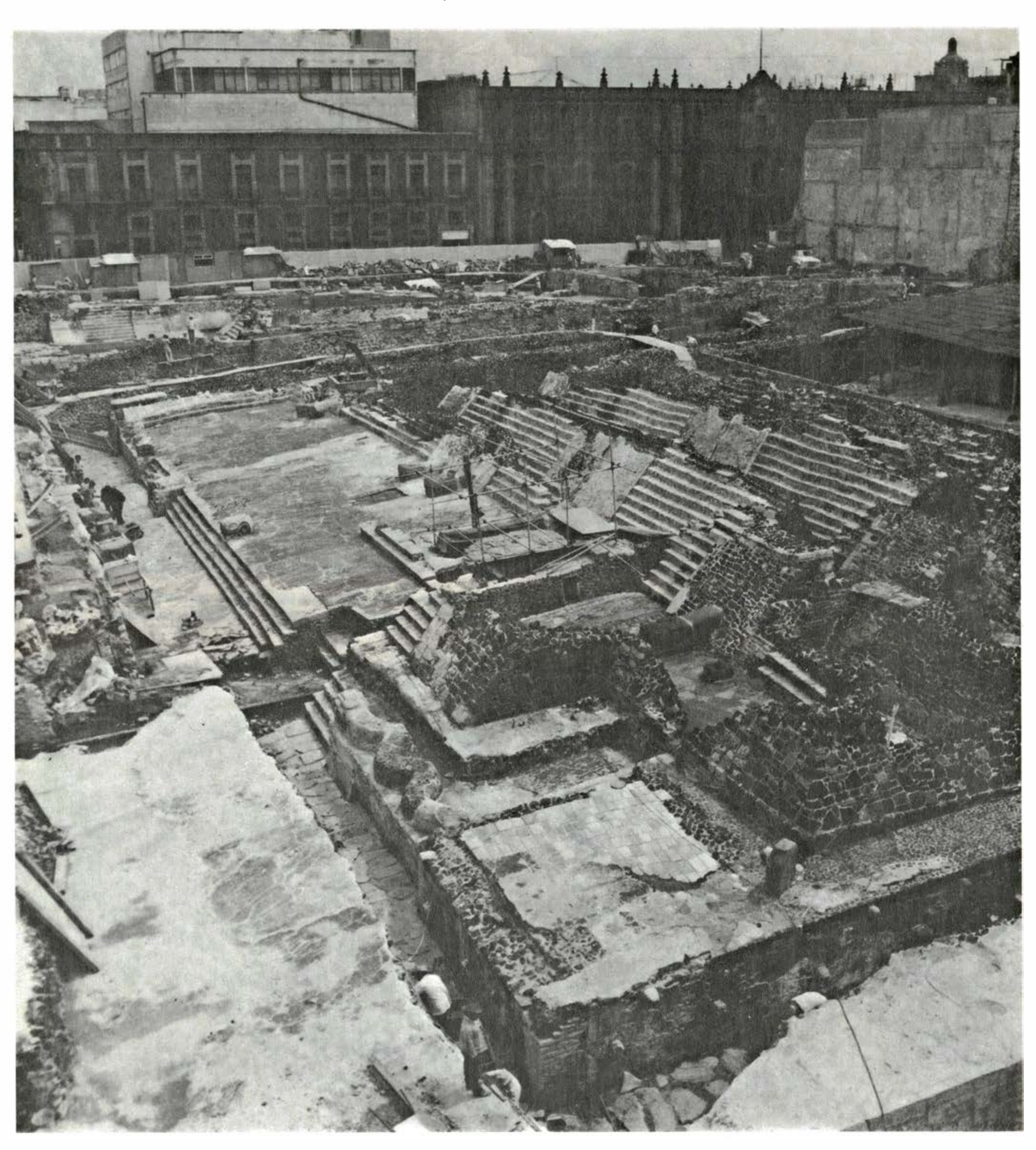
La segunda fase de la investigación consistió en un plan efectivo de excavación, después de haber tenido en cuenta el entorno urbano del templo. Fue necesario examinar detalladamente las estructuras que había en las áreas que iban a ser excavadas y estar seguros de que no resultarían dañadas las que procedían del período colonial español. Se decidió que el Consejo Asesor de Monumentos examinaría cada uno de los casos para ver si un edificio concreto podía ser demolido y seguir adelante con la excavación. De las trece estructuras destruidas finalmente sólo dos tenían algunos elementos que procedían del período colonial. Estos fueron cuidadosamente fotografiados y sus partes fueron numeradas para trasladarlas a la Oficina Nacional de Monumentos.

Ahora estamos en condiciones de confirmar que la última época de construcción mexica del Templo Mayor había sido arrasada hasta sus cimientos por los españoles. Solamente hallamos las huellas del edificio sobre el pavimento de lajas de piedra de la plaza principal. Queda aproximadamente un metro de los restos del muro de la plataforma en el lado norte de la plaza. No obstante, las épocas de construcción anteriores estaban mejor conservadas: eran más antiguas, más pequeñas y estaban más hundidas en relación con el actual nivel de la calle.

Este hecho nos planteó un nuevo problema. Normalmente el nivel del agua en México se encuentra a cuatro o cinco metros por debajo del nivel de la calle. La más antigua de las épocas que se han excavado del Templo Mayor fue la que nosotros denominamos Epoca II; se encontró casi intacta y procede

aproximadamente del año 1390 d.C. Pudimos excavar solamente las partes más altas de este edificio y los restos de los santuarios situados sobre él. Bajar el nivel del agua para así avanzar más en la excavación podría poner en peligro la estabilidad de los edificios coloniales y modernos que hay en los alrededores del templo y la del templo mismo. Quizá más adelante, cuando se encuentre un método que permita controlar el agua subterránea, el templo pueda ser excavado en su totalidad.

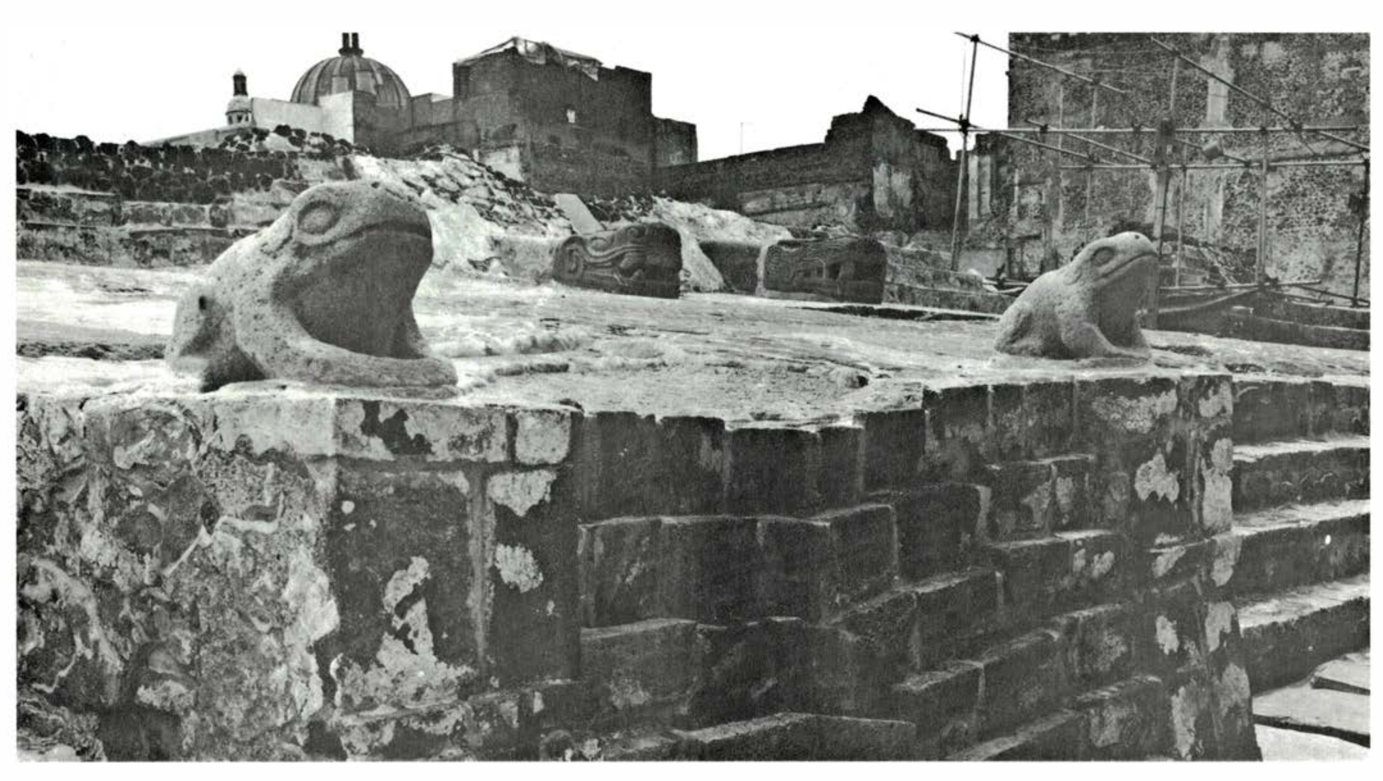
El trabajo comenzó señalando sobre el terreno una parrilla formada por cuadros de dos metros de lado, identificando cada cuadro con una letra y un número. La profundidad bajo el nivel de la calle fue anotada asimismo, mediante la toma de alturas desde un punto fijo. Previmos el descubrimiento de



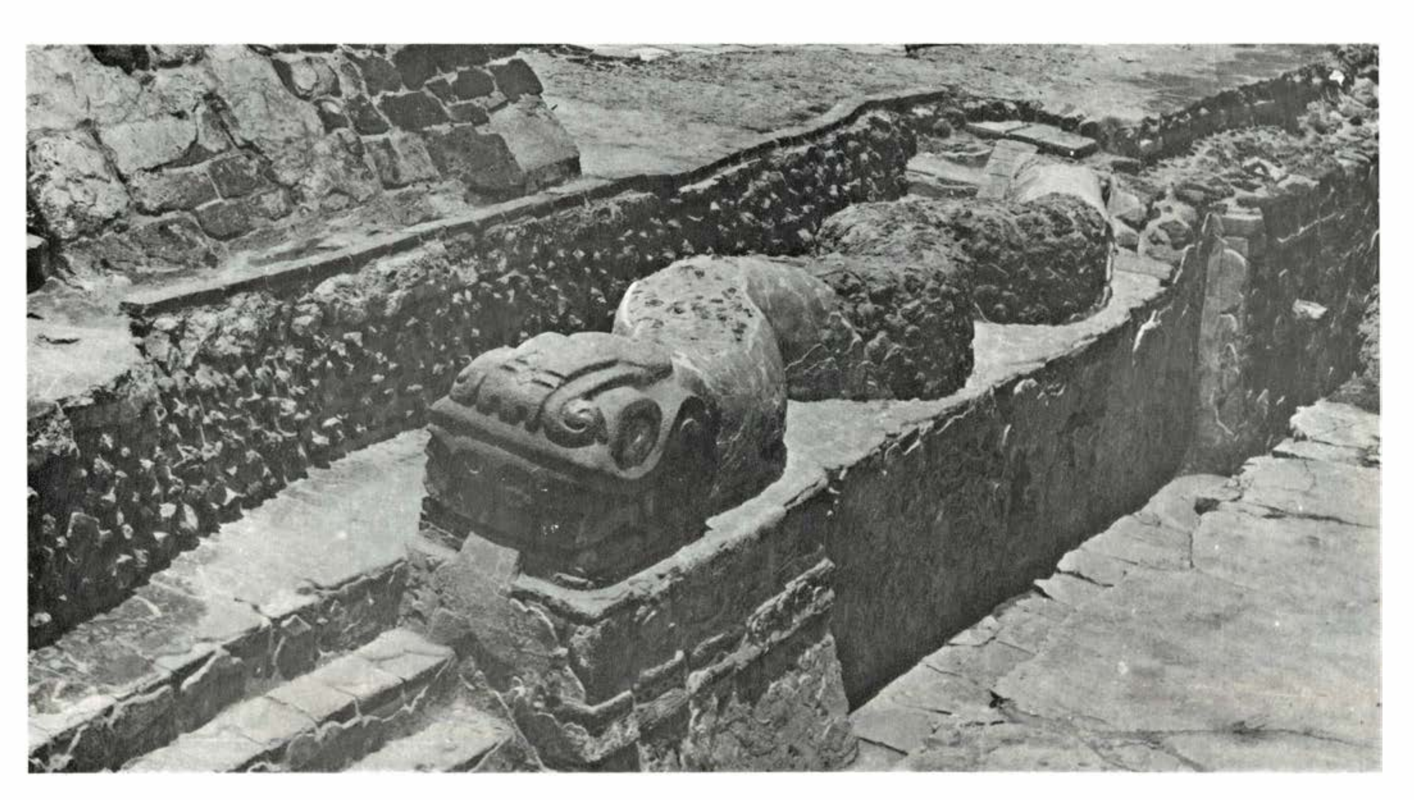
1. RUINAS PARCIALMENTE DESCUBIERTAS del Templo Mayor de Tenochtitlán. En esta fotografía, tomada el año 1982, están vistas desde la calle Argentina de la ciudad de México. El hecho de que en la cumbre de la pirámide hubiera dos santuarios, el de Huitzilopochtli, dios de la guerra (a la derecha del templo), y el de Tlaloc, dios del agua (a la izquierda), se conocía por las fuentes históricas. La excavación lo ha confirmado arqueológicamente. En primer término, en el frente del templo, hay una piedra con una serpiente esculpida, alineada con la escalera que conduce al santuario del dios de la guerra. Más adelante, en el mismo nivel, hay dos ranas (*que no se aprecian bien en la fotografía*) en línea con la escalera que conduce al santuario de Tlaloc, dios del agua. Las serpientes fueron empleadas normalmente como símbolo de Huitzilopochtli; las ranas se utilizaron como símbolo de Tlaloc.

objetos que podrían requerir medidas de preservación inmediatas y, en consecuencia, instalamos un taller cuyos miembros ayudarían inmediatamente a los excavadores cuando se descubrieran objetos delicados tales como ofrendas ceremoniales o restos de pinturas murales. Contamos también con la colaboración de especialistas de varias disciplinas: biólogos, químicos y geólogos del Departamento de Prehistoria del Instituto Nacional de Antropología e Historia; nos asistía la ayuda de una firma consultora de ingenieros expertos en mecánica de suelos, para evitar que los fosos de la excavación atentaran, por su cercanía, contra los edificios que rodean el lugar.

En adelante contrastaré nuestros descubrimientos arqueológicos con las narraciones históricas. Por ejemplo, sa-



2. PAREJA DE RANAS que flanquean un altar situado sobre las losas del recinto ceremonial, en el frente de la pirámide del Templo Mayor. Este monumento en honor de Tlaloc se erigió hacia el año 1469 después de Cristo, en la época de construcción periódica del templo denominada Epoca IVb.



3. SERPIENTE ONDULANTE, también esculpida en la Epoca IVb. El estrato de mampostería de relleno que se ve detrás de la escultura marca una época de ampliación del templo inmediatamente posterior. Los constructores habían llegado a la Epoca VII en el momento de la llegada de los españoles.

bemos por las fuentes históricas que el Templo Mayor tenía sobre su nivel más elevado dos estructuras, una dedicada a Tlaloc y otra a Huitzilopochtli.

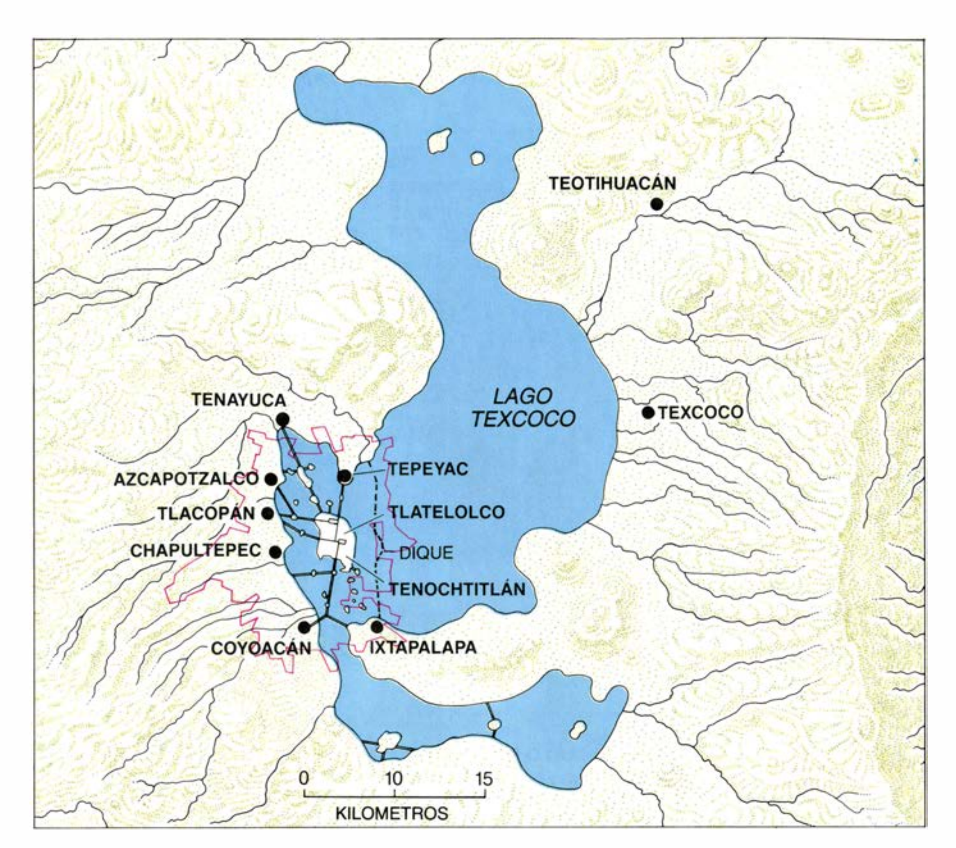
Sobre Tlaloc escribe Sahagún lo siguiente: "Este dios llamado Tlaloc Tlamacazqui era el dios de las lluvias. Tenían que él daba las lluvias para que regasen la tierra, mediante la cual lluvia se criaban todas las yerbas, árboles y frutas y mantenimientos; también tenían que él enviaba el granizo y los relámpagos y rayos, y las tempestades del agua, y los peligros de los ríos y de la mar. El llamarse Tlaloc Tlamacazqui quiere decir que es dios que habita en el paraíso terrenal, y que da a los hombres los mantenimientos necesarios para la vida corporal".

Y el mismo Sahagún dice de Huitzilopochtli: "Este dios llamado Huitzilopochtli fue otro Hércules, el cual fue robustísimo, de grandes fuerzas y muy belicoso, gran destruidor de pueblos y matador de gentes. En las guerras era como fuego vivo y muy temeroso a sus contrarios... A este hombre, por su fortaleza y destreza en la guerra, le tuvieron en mucho los mexicanos cuando vivía".

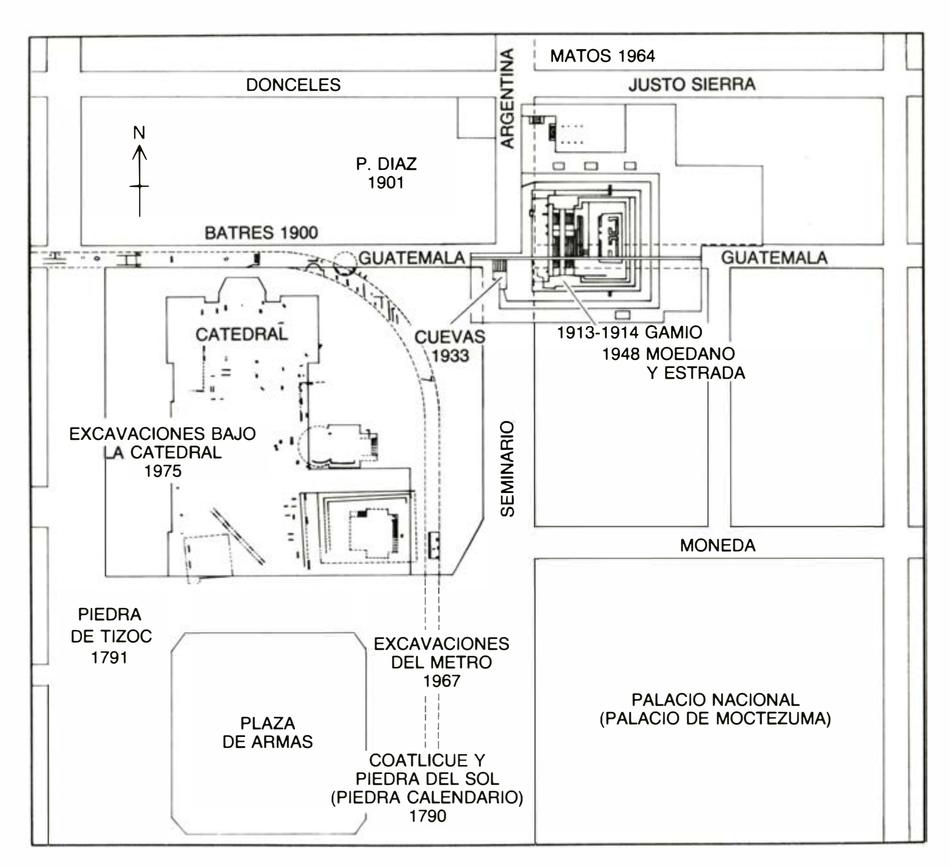
El cronista de las Indias Bernal Díaz del Castillo describe lo que vio tras la conquista de la capital azteca: "En cada altar estaban dos bultos, como de gigante, de muy altos cuerpos y muy gordos, y el primero, que estaba a mano derecha, decían que era el de Uichilobos [*sic*], su dios de la guerra".

Y añade Bernal Díaz: "En lo alto de todo el *cu* [pirámide] estaba otra concavidad muy ricamente labrada la madera de ella, y estaba otro bulto como de medio hombre y medio lagarto... Este decían que el cuerpo de él estaba lleno de todas las semillas que había en toda la tierra, y decían que era el dios de las sementeras y frutas".

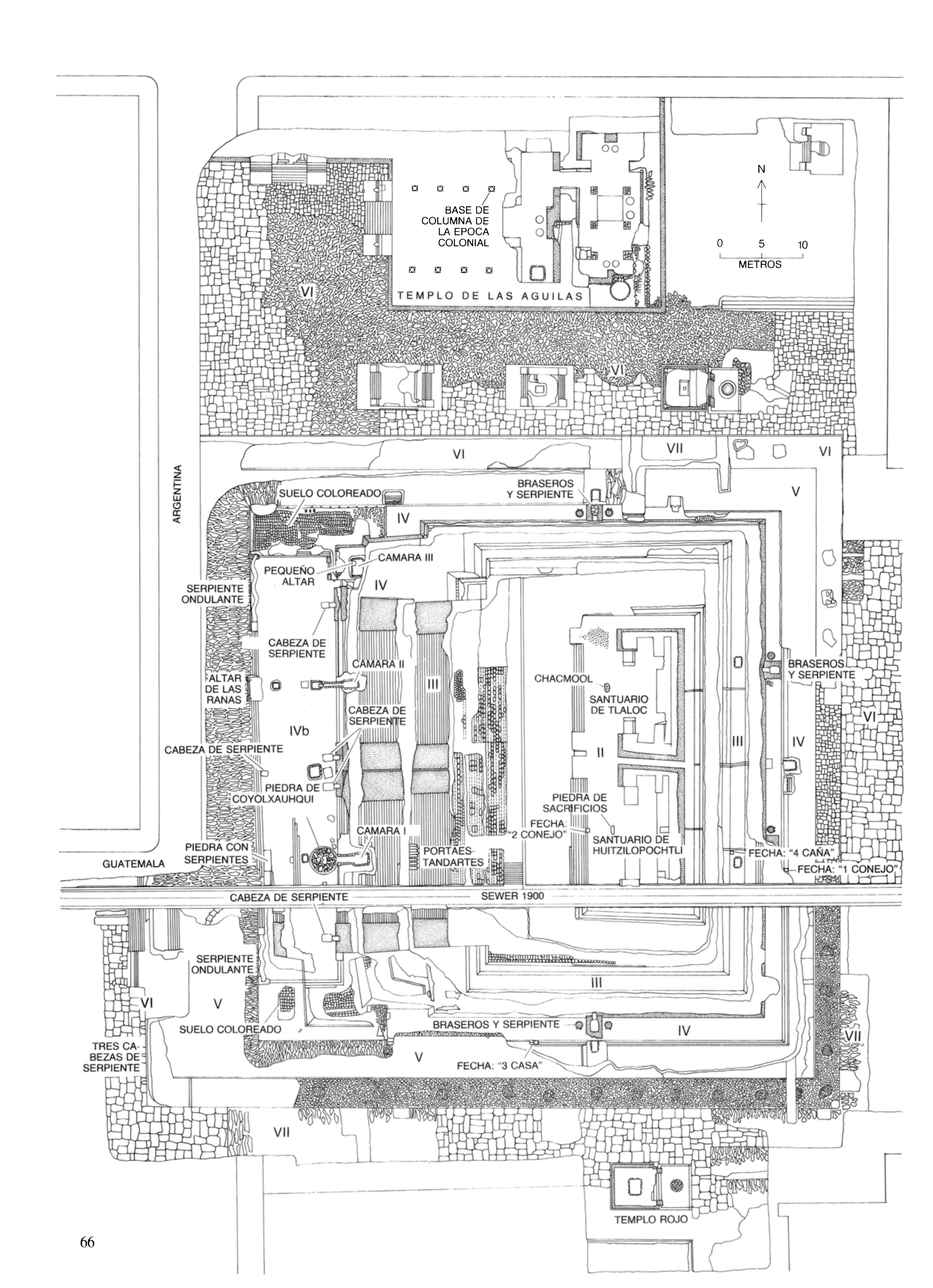
Fray Bernardino de Sahagún escribe del templo mismo: "La principal torre de todas estaba en el medio y era más alta que todas, era dedicada al dios Huitzilopochtli o Tlacauepan Cuexcotzin. Esta torre estaba dividida en lo alto, de manera que parecía ser dos y así tenía dos capillas o altares en lo alto, cubierta cada una con un chapitel, y en la cumbre tenía cada una de ellas sus insignias o divisas distintas. En la una de ellas y más principal estaba la estatua de Huitzilopochtli, que también la llamaban Ilhuícatl xoxouhqui; en la otra estaba la imagen del dios Tlaloc. Delante de cada una de éstas estaba una piedra redonda a manera de tajón



4. ESTABA EL VALLE DE MEXICO dominado por cinco lagos contiguos que se unían durante la estación lluviosa estival. Tenochtitlán, la capital azteca, ocupaba una isla en el lago central, el lago Texcoco. El área definida por una línea roja corresponde con la extensión actual de la ciudad de México.



5. TRABAJOS ARQUEOLOGICOS realizados en el subsuelo de la ciudad de México durante el siglo XX. La esquina suroccidental del Templo Mayor fue descubierta durante los años 1913 y 1914, y examinada posteriormente en 1948. Los dos datos relativos al siglo XVIII (*abajo, a la izquierda y centro*) indican la fecha y el lugar en que fueron descubiertos accidentalmente, siglos después de que los españoles destruyeran el templo, dos monumentos esculpidos: la Piedra Calendario (1790) y la Piedra de Tizoc (1791).



N
0
5
10
METROS
BASE DE
COLUMNA DE
LA EPOCA
COLONIAL
TEMPLO DE LAS AGUILAS
VI
VI
VI
VII
VI
ARGENTINA
BRASEROS
Y SERPIENTE
V
SUELO COLOREADO
IV
CAMARA III
PEQUEÑO
ALTAR
IV
SERPIENTE
ONDULANTE
CABEZA DE
SERPIENTE
CAMARA II
BRASEROS
Y SERPIENTE
ALTAR
DE LAS
RANAS
III
CHACMOOL
SANTUARIO
DE TLALOC
VI
IVb
CABEZA DE
SERPIENTE
CABEZA DE SERPIENTE
III
IV
II
PIEDRA DE
COYOLXAUHQUI
PIEDRA DE
SACRIFICIOS
FECHA:
"2 CONEJO"
CAMARA I
PIEDRA CON
SERPIENTES
PORTAES-
TANDARTES
SANTUARIO DE
HUITZILOPOCHTLI
FECHA: "4 CAÑA"
FECHA: "1 CONEJO"
GUATEMALA
CABEZA DE SERPIENTE
SEWER 1900
SERPIENTE
ONDULANTE
III
VI
V
SUELO COLOREADO
BRASEROS Y SERPIENTE
IV
VII
TRES CA-
BEZAS DE
SERPIENTE
V
FECHA: "3 CASA"
VII
TEMPLO ROJO

que llamaban *téchcatl*, donde mataban los que sacrificaban a honra de aquel dios; y desde la piedra hasta abajo estaba un regajal de sangre de los que mataban en él, y así estaba en todas las otras torres. Estas torres tenían la cara hacia el occidente, y subían por gradas bien estrechas y derechas, de abajo hasta arriba, a todas estas torres".

Al hablar sobre los sacrificios hechos en honor de Xipe Tótec añade Sahagún: "Llegándolos al tajón, que era una piedra de tres palmos en alto o poco más, y dos de ancho, o casi, echábanlos sobre ella de espaldas".



7. **ESTATUA DE CHACMOOL, una figura reclinada, fechada en la Epoca II que se encontró in situ delante del santuario de Tlaloc. La mayor parte de su superficie policromada se ha conservado.**

Ha sido interesante que encontráramos una piedra de sacrificios, el símbolo inequívoco del poder azteca y donde eran sacrificados los cautivos de guerra, frente al santuario de Huitzilopochtli. Es una losa de piedra volcánica negra y sus dimensiones coinciden con las dadas por Sahagún. La piedra mide 50 centímetros por 45, y fue encontrada en su lugar original hundida en el suelo cerca de las escaleras (a unos dos metros de distancia).

En el nivel más alto del lado correspondiente a Tlaloc encontramos una estatua policromada, conocida como *chacmool*, también en su lugar original y en la misma situación que la piedra de sacrificios con relación al santuario de Huitzilopochtli. El hallazgo confirma la interpretación histórica de la función del *chacmool*: es un intermediario entre el sacerdote y la divinidad, un mensajero divino. Ambos elementos –la piedra de sacrificios y el *chacmool*– situados frente a los santuarios pueden ser considerados como símbolos duales, el primer símbolo relacionado con la guerra y el segundo con una idea más "religiosa": el mensajero divino.

Descubrimos que dos grandes pilares de piedra flanqueaban la entrada del santuario de Tlaloc. Las superficies exteriores de los pilares estaban decoradas con una hilera de círculos blancos y negros representando los ojos de Tlaloc; justamente debajo de los círculos había tres bandas horizontales, una azul y dos rojas. La mitad inferior del pilar estaba decorada con bandas negras y blancas alternadas, verticales.

En la superficie interior de cada pilar se halla pintada la figura de un personaje puesto de pie; el cuerpo es de color amarillo y está adornado con brazaletes y ajorcas azules y negros. Tiene el brazo izquierdo extendido sosteniendo un bastón o una lanza. El interior del santuario parece haber estado dividido en dos partes. Una plataforma adosada a la pared posterior servía evidentemente para sostener una imagen de la deidad que en su momento ocupó el santuario. Del centro de la plataforma situada en el santuario de Huitzilopochtli surge un pequeño altar. Se encuentra alineado con la piedra de sacrificios del exterior. Aparentemente el mismo altar sirvió para sustentar una imagen del dios.

Embutidos en los pilares encontramos trozos de madera en ambos santuarios. Deben ser los restos de paneles decorados; tanto Bernal Díaz como Hernán Cortés vieron paneles de madera ricamente tallados en los santuarios aztecas.

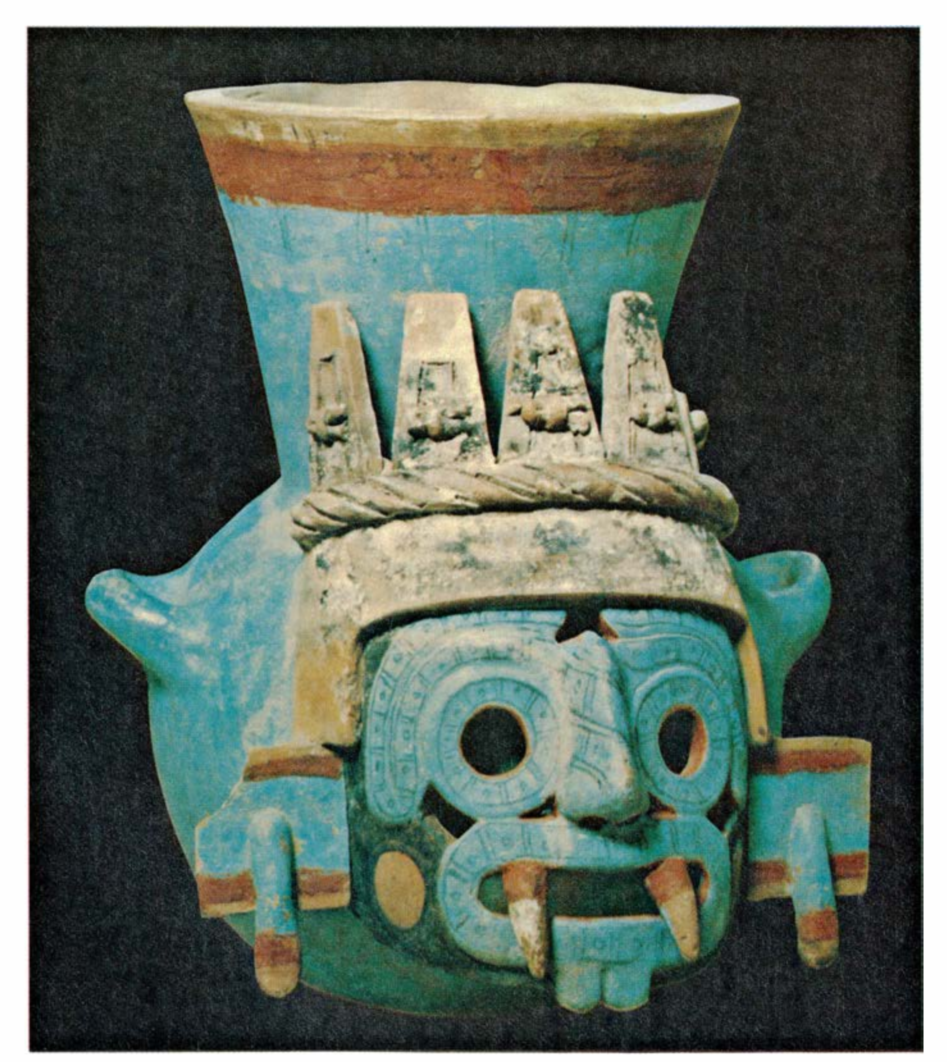
Todos estos restos formaban parte de la primitiva construcción del Templo Mayor denominada Epoca II. Esta época data probablemente del período anterior al año 1428 d.C., el año en que los mexicas de Tenochtitlán comenzaron su guerra de liberación contra sus señores de la vecina Azcapotzalco. Informaciones de diverso orden nos llevan a esta conclusión; entre otras, el pequeño tamaño del edificio y el hecho de que la Epoca II es la más antigua de las excavadas hasta ahora. Además, sobre el último peldaño del lado de Huitzilopochtli, alineada con la piedra de sacrificios, hay esculpida una cara con dos glifos sobre ella. Uno de los glifos señala la fecha "2 Conejo"; el otro es ilegible. La fecha "2 Conejo" puede ser identificada como el año 1390 de la era cristiana.

Hasta diez épocas de construcción más, cada una de ellas ampliando el templo, se edificaron sobre esta estructura primitiva. Sólo cinco de ellas fueron ampliaciones de toda la pirámide, esto es, expansiones por los cuatro lados. Las otras cinco ampliaron única-

6. **RESTOS DEL TEMPLO MAYOR atribuibles a las siete principales épocas de construcción, combinadas en esta reconstrucción parcial. Los santuarios de Tlaloc y Huitzilopochtli, dando frente respectivamente a un *chacmool* y a una piedra de sacrificios, aparecen tal y como estaban en la Epoca II. El segundo grupo de escalones que descienden hacia el oeste procede de la Epoca III. El grupo de escalones contiguo al anterior procede de la Epoca IV. La plataforma que hay por debajo de ellos, en la que están las serpientes gigantescas, la piedra de Coyolxauhqui que aparece en la portada de este número y el altar de las dos ranas, corresponden a la Epoca IVb. La Epoca V está representada por la parte inferior de la plataforma que se extiende a los tres lados del templo. La construcción de la Epoca VI está representada por las lajas del suelo de los cuatro lados y por varios templetes: al norte el Templo de las Aguilas y tres plataformas, y al sur el Templo Rojo. La destrucción del último templo por los conquistadores españoles fue tan completa que la Epoca VII solamente ha quedado representada por pequeñas superficies de lajas en el suelo y por un pequeño trozo de plataforma. (Dibujos realizados por Patricia J. Wynne.)**



8. CISTERNA DE OFRENDAS (un depósito de paredes de piedra), hallada bajo el pavimento de la Epoca IVb. Se denominó Cámara III, contiene figurillas, máscaras y dos bellas vasijas de cerámica.



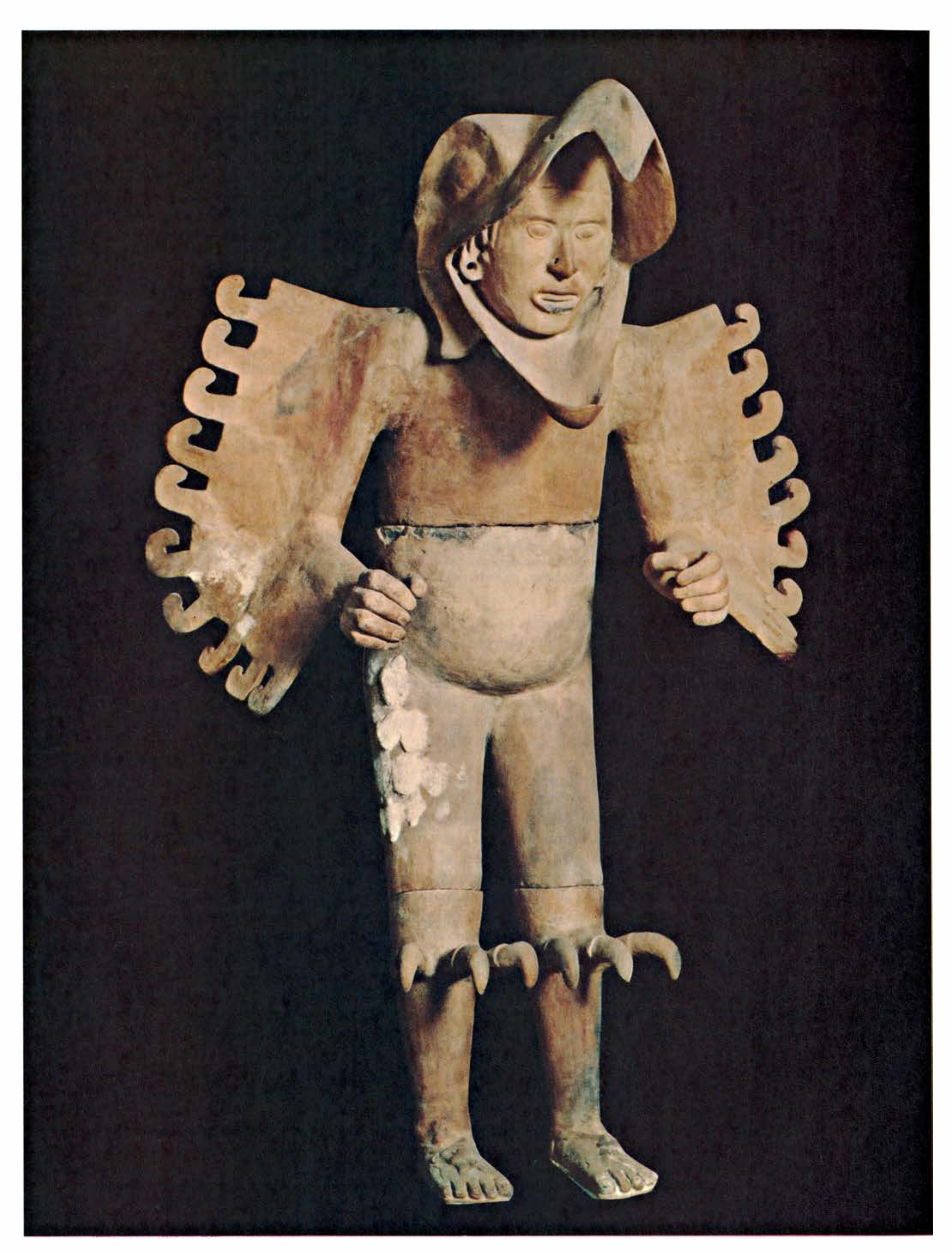
9. VASIJA QUE REPRESENTA A TLALOC, dios del agua. Es uno de los muchos tipos de cerámica encontrados en los depósitos de ofrendas del Templo Mayor de Tenochtitlán. Muchos de los objetos recuperados en el templo proceden de diversos lugares de México que estaban dominados por los aztecas, pero esta imagen del dios del agua parece ser obra de un artesano residente en la ciudad de Tenochtitlán.

mente la fachada principal del templo. Resulta evidente que la capa de mortero que cubre la Epoca II tuvo un volumen mucho mayor que la que cubre cualquiera de las fachadas posteriores. Esto lleva a la conclusión de que cuando los mexicas se liberaron del yugo de Azcapotzalco quisieron construir un tempo más grande y tuvieron medios para hacerlo, incluyendo gente que fue obligada a transportar tierra y roca volcánica para el relleno hasta el lugar de la edificación y para proporcionar otros materiales de construcción.

Describiré ahora brevemente las siguientes épocas de construcción del Templo Mayor y trataré, asimismo, de las otras estructuras halladas cerca del templo durante la excavación. Para comenzar con la Epoca III, las escaleras de esta época están bien hechas y los muros de los diferentes niveles de la pirámide están verticalmente dispuestos. Ocho figuras representando a otros tantos portaestandartes se encontraron sobre las escaleras del lado de Huitzilopochtli. Estas esculturas debieron haber adornado la Epoca III del templo, pero cuando comenzó la siguiente época de construcción fueron recogidas y puestas juntas sobre la escalera en la que fueron encontradas. En la pared posterior de la plataforma del lado de Huitzilopochtli fue grabado el glifo "4 Caña", que refiere al año 1431 después de Cristo.

La construcción de la Epoca IV llevó consigo adiciones que hicieron al templo especialmente suntuoso. La plataforma fue decorada por sus cuatro lados con braseros y cabezas de serpiente. Los braseros del lado de Tlaloc están adornados con la cara del dios del agua; los del lado de Huitzilopochtli aparecen decorados con un nudo, un símbolo de la deidad guerrera. Justamente debajo de los braseros y serpientes desenterramos diversas ofrendas depositadas en cisternas o cámaras con paredes de piedra.

La Epoca IVb constituía un añadido a la fachada principal (la del lado oeste): una amplia plataforma que se extiende frente al templo. A ambos extremos de esta amplia e ininterrumpida superficie encontramos unas enormes serpientes de piedra con cuerpo ondulante y cabeza descomunal, que aún conservaban parte de la pintura que las había cubierto originalmente. Un pequeño altar flanqueado por dos ranas se encuentra situado en línea con el centro de la escalera que conducía a la parte del templo dedicada a Tlaloc. En



10. CABALLERO AGUILA, una figura de cerámica de tamaño natural de casi dos metros de altura; es una de las más perfectas de las encontradas en el Templo Mayor. La figura pudo estar cubierta originalmente con un ropaje de águila. Las alas de los brazos, las garras bajo las rodillas y la gran máscara de pájaro identifican la figura como una representación de una de las órdenes militares aztecas. Los miembros de la otra orden iban vestidos de jaguar.





11. CUCHILLOS CEREMONIALES, pintados con ocre rojo y decorados con dientes de concha y ojos con pupilas de obsidiana, semejantes a los que utilizaban los aztecas para extraer el corazón de los cautivos que eran víctimas del sacrificio ritual. En el extremo inferior, un terrón de incienso de copal.

el lugar correspondiente del lado de Huitzilopochtli, una piedra de dos metros de largo y decorada con serpientes forma parte del borde de la plataforma

Los restos de la pirámide del templo propiamente dicha incluyen la base de las escaleras con cuatro grandes cabezas de serpiente hechas de piedra, están situadas una en cada extremo y dos en el centro del conjunto, señalando el lugar de encuentro entre las dos mitades del templo. La parte de plataforma situada enfrente de las escaleras del lado de Huitzilopochtli es el lugar en donde los obreros que estaban cavando el socavón encontraron la monumental escultura de Coyolxauhqui en 1978 Esta última era la diosa hermana de Huitzilopochtli que conspiró contra él antes de que naciera, y de la que se vengó desmembrándola sobre el cerro de Coatepec. La pirámide del templo es, de hecho, una representación del mitológico cerro.

En el interior de la plataforma encontramos varias ofrendas; algunas alrededor del relieve de Coyolxauhqui, otras entre las dos cabezas de serpiente situadas en el centro de la plataforma y otras alineadas con el centro de la escalera de Tlaloc. Todas estaban enterradas bajo el suelo de la plataforma excepto las ubicadas en las cámaras I y II, que se hallaron bajo las escaleras del templo. En los extremos norte y sur de la plataforma había habitaciones con suelos de piedra coloreada, y en el extremo norte había un pequeño altar con escaleras. En su interior había dos ofrendas dedicadas a Tlaloc, una de las cuales estaba formada por más de 42 cráneos y huesos de niños.

Nosotros pensamos que, en líneas generales, la Epoca IV corresponde con el reinado del señor azteca Moctezuma I, porque la fecha "1 Conejo", equivalente al año 1454, está grabada en la parte posterior del templo en el lado de Huitzilopochtli. El añadido de Coyolxauhqui y las serpientes en la Epoca IVb puede datar probablemente del reinado de Axayacatl Un glifo situado en el lado sur de la pirámide representa la fecha "3 Casa" (1469), el año en que Axayacatl se convirtió en Tlatoani (palabra azteca para designar al que habla o gobierna).

Descubrimos que la plataforma del templo que se hallaba asociada con la Epoca V estaba recubierta de estuco. Descubrimos también una parte del suelo del recinto ceremonial formado por lajas de piedra. La Epoca VI, que era la penúltima, está representada por los restos de parte de la plataforma del templo Un muro del lado oeste está decorado con tres cabezas de serpiente empotradas en la pared. También pertenecen a la Epoca VI los templetes que se encuentran en el lado norte del Templo Mayor, la Plataforma de las Aguilas y la superficie de losas de piedra sobre las que están levantadas estas estructuras. Al sur del Templo Mayor hay una estructura, a la que denominamos el Templo Rojo, que es la simétricamente correspondiente con el templete del lado norte.

La que los españoles vieron, última del Templo Mayor, es la Epoca VII. En general sus restos se limitan a parte del suelo de lajas del recinto ceremonial y a lo poco que quedó tras la destrucción del templo. Aunque en el lado nordeste se puede apreciar parte de la plataforma, ésta pertenece a la época anterior. Aparentemente, en la Epoca VII los pequeños edificios que había junto al templo en la Epoca VI fueron cubiertos con un relleno de tierra y piedras y sobre ellos se echó un suelo. La plataforma del Templo Mayor se construyó sobre la anterior sin hacer ninguna ampliación.

Durante la excavación desenterramos más de cien ofrendas compuestas por más de 7000 artefactos. Muchos de éstos eran de origen mexica, pero muchos otros procedían de las regiones tributarias de Tenochtitlán. La inmensa mayoría de ellos había llegado de la región que hoy ocupa el estado de Guerrero, del área mixteca –en Oaxaca–, de la costa del golfo de México, de Puebla y de otras partes de México. Pero ni uno solo de los objetos es atribuible a los vecinos tarascos o a las culturas mayas.

Entre los objetos que entregaban los habitantes de las regiones tributarias se encontraban muchas piezas de piedra labrada Entre ellas había máscaras y figuras de diversos tipos y tamaños, realizadas en el estilo mezcala de Guerrero, y piezas de alabastro de la región de Puebla que incluían cabezas de ciervos y representaciones de deidades sedentes Dos magníficas urnas funerarias de cerámica anaranjada proceden

12. ESTELA CONMEMORATIVA del Templo Mayor. En la parte superior tiene esculpidos dos miembros del linaje real azteca, un gobernante y su sucesor, dando cara a ambos lados de una bola de zacate para los sacrificios. Ambos se están extrayendo sangre de la oreja. Los exagerados chorros de sangre caen sobre la bola de zacate antes de introducirse en la boca de un monstruo que representa la tierra. El glifo grabado en la parte inferior de la estela representa la fecha "8 Caña" (1487), el año en que se celebró la ceremonia de terminación de una de las épocas de ampliación del Templo Mayor.



de la costa del golfo. En su interior había restos de huesos incinerados, collares y otros materiales. En otras ofrendas se encontraron conchas marinas, espinas de pescado, apéndices de pez sierra y corales tanto de la costa del Golfo como del Pacífico.

Poco más se puede añadir por ahora ya que los materiales están todavía en fase de estudio. Esta labor constituye la tercera fase de nuestra investigación: la interpretación. No obstante, se puede afirmar que todos los materiales hallados –por ejemplo, todos los objetos de origen marino– representan a Tlaloc o son símbolos asociados con el dios del agua. Huitzilopochtli no estaba representado por ningún artefacto, pero sí hay símbolos del dios de la guerra, tales como cráneos y cuchillos ceremoniales decorados con ojos y dientes de concha.

Para ayudar al lector a comprender la importancia que estas ofrendas tenían no puedo hacer nada mejor que citar a fray Diego Durán y al cronista Bernal Díaz del Castillo. Durán escribe lo siguiente: "Viendo el rey Montezuma la prisa con que su templo se hacía, mandó a todos los señores de la tierra que para que su dios fuese más honrado y reverenciado, que se recogiesen por todas las ciudades mucho número de piedras preciosas, de piedras de yjada verdes, que ellos llaman *chalchiuites*, y beriles y piedras de sangre, esmeraldas y rubíes y cornerinas; en fin, de todo género de piedras ricas y preciadas joyas y muchas riquezas, y que a cada braza que el edificio creciese fuesen echando, entre la mezcla, de aquellas piedras preciosas y ricas joyas, y así echando por cabezas aquel tributo, cada ciudad acudía con sus piedras y joyas a echar su lecho de ellas por su rueda y tanda, de suerte que a cada braza del edificio echaban tanta cantidad de piedras y joyas ricas que era cosa de admiración, diciendo que pues su dios daba aquellas riquezas, que no era inconveniente se empleasen en su servicio, pues era suyo".

Refiriéndose al momento en que los españoles destruyeron en la ciudad de Tlatelolco un templo similar al Templo Mayor, Bernal Díaz escribe: "Dirán ahora algunos lectores muy curiosos que cómo pudimos alcanzar a saber que en el cimiento de aquel gran *cú* [pirámide] echaron oro y plata y piedras de *chalchiuite* [jade] ricas y semillas, y lo rociaban con sangre humana de indios que sacrificaban, habiendo sobre mil años que se fabricó y se hizo. A esto doy por respuesta, que después que ganamos aquella fuerte y gran ciudad y se repartieron sus solares, que luego propusimos que en aquel gran *cú* habíamos de hacer la iglesia de nuestro patrón y guiador Señor Santiago, y cupo mucha parte de la del solar del alto *cú* de Uichilobos [*sic*], y cuando abrían los cimientos para hacerlos más fijos, hallaron mucho oro y plata y *chalchuite* y perlas y aljófar y otras piedras; y así mismo a un vecino de México, que le cupo otra parte del mismo solar, halló lo mismo".

¿Qué concepto subyace bajo el hecho de que ambas deidades compartieran la cúspide del Templo Mayor? Ya se ha mencionado la vertiente económica de esta dualidad; quedan por discutir sus implicaciones políticas. El templo doble, como modelo de edificio monumental, estaba presente en México Central en fechas tempranas, ya en el siglo XIII, por ejemplo en Tenayuca y, posteriormente, en otros lugares de cultura mexica como Teopanzalco, Santa Cecilia, Tlatelolco y, por supuesto, Tenochtitlán. Nosotros pensamos que el modelo surgió como resultado de la lucha por el poder entre dos grupos de intereses durante el Período Clásico (300-900 d.C.). Así, parece probable que en la ciudad estado de Teotihuacán, que muchos especialistas consideran que tuvo una organización política de carácter teocrático, el control sobre la población era ejercido por el grupo de los sacerdotes con la colaboración de un ejército coercitivo. La lucha entre los dos grupos contrapuestos pudo terminar finalmente con la unión de ambos sistemas políticos, el ideológico del clero y el represivo de los militares, para controlar a toda la sociedad. Esto es evidentemente lo que sucedió entre los mexicas, cuyo señor supremo era al mismo tiempo el sumo sacerdote y jefe del ejército. La alianza política de sacerdotes y guerreros quedó simbolizada en los santuarios dobles de Tlaloc y Huitzilopochtli, construidos en la cúspide del mayor templo de la ciudad. Por lo demás, ambos aspectos se encarnan en la persona del único soberano mexica, el Tlatoani.

En definitiva, el Templo Mayor de Tenochtitlán simbolizaba para los pueblos mexicas el agua y la guerra, la vida y la muerte, Tlaloc y Huitzilopochtli. Constituía un lugar de gloria y ofrenda para los mexicas y un lugar de martirio para aquellos que estaban bajo su dominio.

Fibras ópticas en vegetales

Los tejidos de plántulas conducen la luz hasta distancias de varios centímetros. Las células vegetales podrían aprovecharse de esos "viaductos lumínicos" para coordinar aspectos de su fisiología

Dina F. Mandoli y Winslow R. Briggs

Las plantas emplean la luz de dos formas distintas. En una de ellas, la fotosíntesis, la luz constituye una fuente de energía: suministra potencia a la síntesis de moléculas orgánicas. En la otra, la luz es una fuente de información, es decir, constituye una señal. La luz puede determinar que una semilla germine o no, el ángulo que forme una raíz con la gravedad, el ángulo de un tallo con la dirección de la luz incidente, la velocidad de elongación de un tallo o de expansión de una hoja y el momento de floración de una planta. En todos esos casos, la energía que la señal requiere para desencadenar la respuesta es varios órdenes de magnitud menor que la necesaria para llevar a cabo la propia respuesta.

Se añade ahora a ello una nueva propiedad: parece que los tejidos vegetales, en particular los de las etioladas (plántulas sumidas en la oscuridad por debajo del plano del suelo), pueden guiar la luz. En esencia, la plántula actúa a modo de haz de fibras ópticas. En el departamento de biología vegetal de la Institución Carnegie de Washington hemos detectado esa conducción de luz, a través de columnas de células de tallos de plántulas etioladas, en distancias de hasta 4,5 centímetros. Quiere ello decir que la luz, además de atravesar docenas, incluso centenares, de células, ha salvado las complejas interfases fotodispersoras que se dan entre células contiguas. Cabe imaginar, a partir de ese "tendido fótico", que las partes de la plántula enterradas en el suelo comienzan a responder a la luz en cuanto el extremo de la plántula atraviesa la superficie del suelo, o incluso antes si el suelo la transmite en suficiente cantidad. Dentro de un ámbito más especulativo, diríase que la conducción lumínica ayuda a coordinar la actividad de las células mientras la planta se va desarrollando. Los vegetales, después de todo, no tienen nada que recuerde al sistema nervioso. ¿Por qué no habrían de valerse, en ciertas circunstancias, de fibras ópticas?

Comentaremos en primer lugar las señales que las plantas captan de la luz y la medición de las mismas. Fenómenos ambos de extraordinaria complejidad. En esencia, las plantas obtienen cuatro tipos distintos de información a partir de la luz que incide sobre ellas; a saber: cantidad, cualidad (esto es, su distribución espectral), dirección y duración de la luz. Las mediciones las efectúan moléculas de pigmentos alojadas en el interior celular; entre los diversos pigmentos destaca el que se ha denominado fitocromo. Ha sido objeto de estudio en numerosos laboratorios, el nuestro incluido.

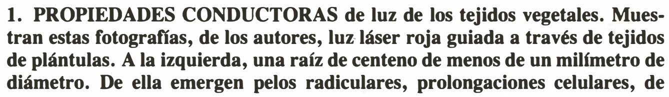
El fitocromo, dotado ópticamente para determinar la cualidad de la luz, mide la proporción de energía entre dos zonas muy estrechas del espectro: la parte roja (longitudes de onda cercanas a los 660 nanómetros) y la parte infrarroja cercana, justo después del visible (longitudes de onda próximas a los 730 nanómetros). La razón de su idoneidad para efectuar las mediciones radica en su conducta fotoquímica: la absorción de luz roja lo convierte en una forma que dota a la molécula de particular sensibilidad a la luz infrarroja. Y a la inversa, la absorción de luz del infrarrojo cercano lo convierte en una forma preferentemente sensible a la luz roja. La cualidad espectral de la luz absorbida por el fitocromo determina, por tanto, en qué forma se encuentra.

Solemos referirnos al fitocromo abreviándolo con el símbolo P, y denotamos su estado con un subíndice; así P_r indica la forma absorbente de luz roja, predominante en plantas que han crecido en la oscuridad o en una sombra muy densa. (En el ambiente de una planta en sombra hay más luz del infrarrojo cercano que roja, ya que las hojas que dan sombra a esa planta absorben selectivamente el rojo. La luz infrarroja mantiene el fitocromo de las plantas en sombra en la forma preferentemente sensible al rojo.) P_{fr} denota la forma que absorbe luz del infrarrojo cercano; predomina ésta en plantas que crecen con luz natural no filtrada. Se supone que P_{fr} es la forma activa del pigmento, la que potencia las respuestas de la planta.

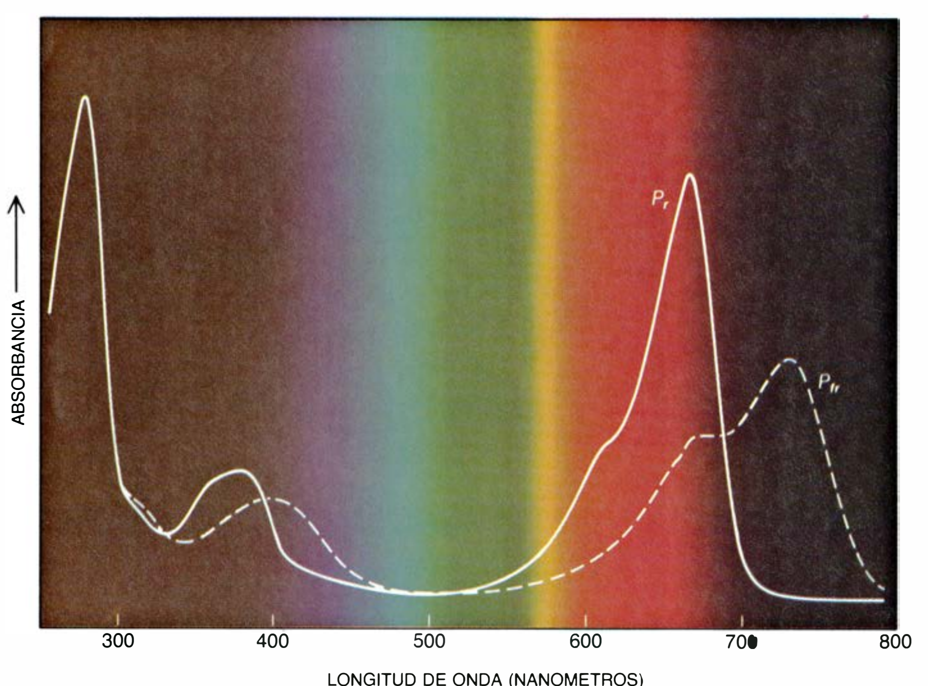
Las respuestas de la planta se encuadran en cuatro clases; en todas ellas participa el fitocromo. Las así llamadas respuestas a baja fluencia incrementan su grado de respuesta conforme crece la fluencia, o cantidad, de luz roja. La mayoría puede saturarse con unos pocos minutos de luz roja. Ejemplos de ello son la germinación de las semillas, la direccionalidad del desarrollo radicular (en particular la alteración de la direccionalidad impuesta por la gravedad) y la elongación de tallos de plántulas etioladas. Las respuestas a baja fluencia dependen de la cantidad y de la cualidad de la luz. Las semillas de lechuga mantenidas en oscuridad y sometidas a destellos secuenciales de luz nos ofrecen un ejemplo espectacular. Las semillas sólo germinan si el último destello de la secuencia es rojo. Permanecen en letargo si el último destello es del infrarrojo cercano.

Las respuestas de final de día se parecen superficialmente a las respuestas a baja fluencia. De una manera similar a éstas, aquéllas requieren muy pequeñas cantidades de luz, pueden detenerse por medio de luz (esto es, los procesos químicos iniciales en que se apoyan pueden invertirse) y miden tanto la luz roja como la infrarroja. Por otra parte, dependen de la luz en un momento preciso: el final del día. La elongación del tallo de girasol vale de ejemplo. La elongación, y por tanto la altura de la planta, es la mayor posible si la luz infrarroja domina en la iluminación de la caída del día.

Respuestas a alta irradiancia requieren mucha más luz que las respuestas a



1. PROPIEDADES CONDUCTORAS de luz de los tejidos vegetales. Muestran estas fotografías, de los autores, luz láser roja guiada a través de tejidos de plántulas. A la izquierda, una raíz de centeno de menos de un milímetro de diámetro. De ella emergen pelos radiculares, prolongaciones celulares, de unos pocos micrometros de diámetro. La luz llega, guiada, hasta el ápice de los pelos. La fotografía de la derecha muestra un tallo curvado de una plántula de avena de un milímetro de diámetro. La luz recorre incluso curvas. En su actuación, el tallo remeda el proceder de un haz de fibras ópticas de vidrio.



2. LA MOLECULA FOTOABSORBENTE DEL FITOCROMO interviene en muchas de las respuestas de las plantas a la luz. La molécula puede hallarse en dos formas, que dan las conductas de absorción que se muestran en la figura. En una forma, designada P_r (*línea continua*), la molécula es preferentemente sensible a la luz roja. En la otra, P_{fr} (*línea a trazos*) es preferentemente sensible a la luz del infrarrojo cercano, esto es, la luz de transición del rojo al infrarrojo. La absorción de luz roja cambia P_r en P_{fr}; la absorción subsecuente de luz del infrarrojo cercano cambia P_{fr} en P_r. El pico de absorción de la zona izquierda, en ambos espectros, lo producen varios aminoácidos del componente proteico de la molécula.

baja fluencia. Además, exigen exposiciones de horas, no de minutos, para alcanzar la saturación. Nos lo confirma, otra vez, la elongación de los tallos. El ambiente infrarrojo de una planta en sombra puede fomentar la elongación rápida del tallo para que la cima de aquélla emerja a través del dosel de vegetación que la cubre.

Finalmente, algunas respuestas dependen de la longitud del día. El ejemplo más notable es la floración de una planta. Constituye quizá la más familiar de las respuestas de una planta a la luz y, sin embargo, quizá sea la menos conocida de todas las respuestas mediadas por fitocromo. Algunas plantas requieren días largos para florecer; otras, días cortos; y unas terceras parecen libres de tal condicionamiento. Evidentemente, todas las plantas con flor sensibles a la longitud del día, deba ser éste corto o largo, detectan la longitud del día y de la noche. Si una planta recibe un único destello de luz roja durante la noche se comporta como si los días fuesen largos. Se desconoce la razón; quizá la respuesta comporte la interacción entre el fitocromo y un ritmo circadiano, o ciclo diario, de la planta. Los horticultores explotan ese fenómeno: aplican luz artificial a plantas de día corto, como los crisantemos, para retrasar la floración en el invierno y alargar la estación en la que se producen flores.

Nuestras propias investigaciones sobre las propiedades del fitocromo y de las fibras ópticas de los vegetales comenzaron con ciertas sorpresas en las respuestas a baja fluencia. Cultivábamos plántulas de avena, que manifiestan una conducta de germinación muy característica. Primero emerge una raíz de la semilla; este es, por definición, el comienzo de la germinación. La raíz se dirige hacia abajo, emitiendo proyecciones denominadas pelos radiculares. Luego emerge un tallo, de estructura más complicada, compuesto por el mesocótilo, o tallo primero, y, por encima de él, el coleóptilo, un cilindro de tejido foliar que protege las hojas primarias, las primeras verdaderamente fotosintéticas. El mesocótilo y el coleóptilo se unen por una estructura denominada nodo, que aparece como una pequeña protuberancia en el tallo. Comprimidas en el nodo se encuentran numerosos grupos de células destinadas a convertirse en hojas. En herbáceas como la avena, los nodos constituyen los sitios principales de proliferación de las células (de ahí que pueda segarse el césped sin matarlo). En el resto del tallo, el crecimiento procede principalmente por elongación celular y proliferación.

El mesocótilo permite colocar el nodo justo debajo del plano del suelo, con independencia de la profundidad a que se entierre el grano. Y así el mesocótilo crece rápidamente en oscuridad, desarrollo que va inhibiéndose a medida que aumenta la cantidad de luz que encuentra en su progresión hacia la línea de superficie del suelo. El coleóptilo actúa en un sentido opuesto. Crece paulatinamente en la oscuridad para acelerar el ritmo si la cantidad de luz aumenta. Cuando la planta brota a través del suelo, el coleóptilo cesa de crecer y la primera de las hojas verdaderamente fotosintéticas, desarrolladas en paralelo al crecimiento del coleóptilo, brota a través del extremo de éste. Comienzan entonces a expandirse y desarrollarse para convertirse en órganos de plena capacidad fotosintética.

La inhibición del crecimiento del mesocótilo inducida por la luz y la concomitante promoción del crecimiento del coleóptilo se cuentan entre las respuestas a baja fluencia mediadas por fitocromo más estudiadas. Nos sorprendió, por tanto, que las respuestas de las plantas de avena se apartaran considerablemente de lo esperado cuando repetíamos los protocolos de crecimiento e irradiación empleados por otros investigadores. Al poco tiempo obtuvimos una explicación: un grupo de plantas que germinaban en absoluta oscuridad actuaba de manera distinta de otros que se habían iluminado ocasionalmente con una luz verde de seguridad. Las plantas expuestas a esa luz de seguridad tendían a inhibir el crecimiento del mesocótilo y a promover el crecimiento del coleóptilo. Actuaban como si hubiesen "visto" una pequeña cantidad de luz roja.

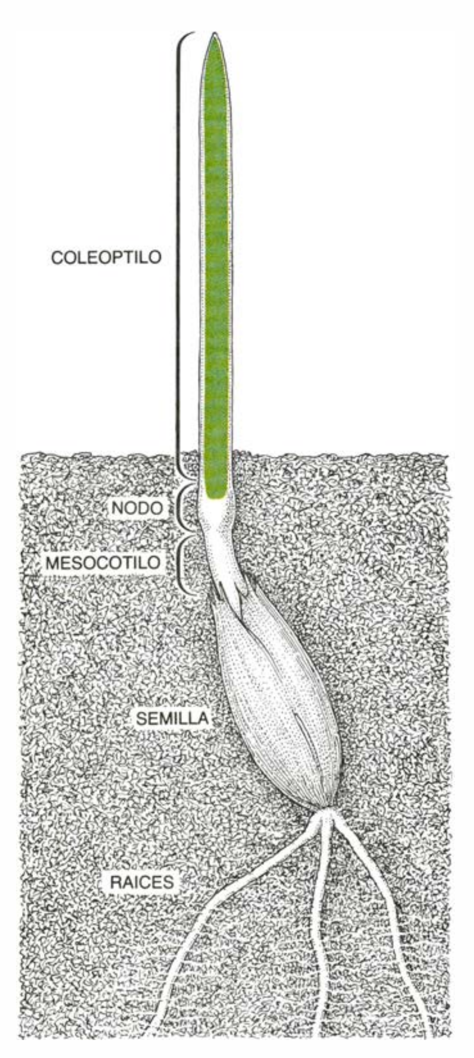
La explicación no es inverosímil. P_r absorbe muy mal la luz verde. Aun así, absorbe algo de luz. De hecho, la luz verde convierte P_r en P_{fr} con una eficacia 10 veces menor que la de la luz roja. Por otra parte, la respuesta de una planta a la formación de P_{fr} ocurre en una magnitud varios órdenes superior a la concentración de P_{fr}. La misma conversión de una pequeña proporción de P_r en P_{fr} por luces roja o verde promovería un cambio detectable en las respuestas de la planta a baja fluencia. Varios de los experimentos iniciales utilizaron como fuente de luz diales luminosos de relojes. Las plantas se mostraron sensibles a la luz.

Se traducía ello en que nuestros experimentos sobre el crecimiento de las plántulas de avena debían efectuarse en absoluta oscuridad. Procedimos entonces, en lo que llamamos "oscuridad de grado reactivo", a medir la respuesta del mesocótilo y del coleóptilo de plántulas de avena etioladas a fluencias de luz roja cada vez mayores. Los datos demostraron que ambos órganos pre-

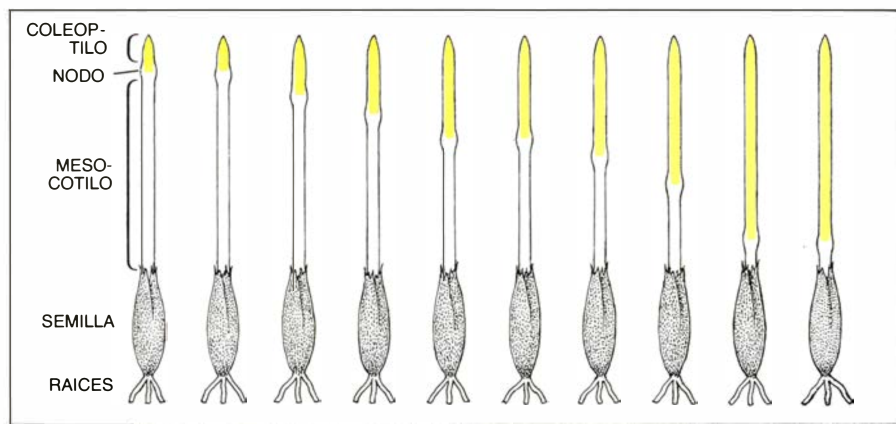
sentaban respuestas muy pronunciadas ante minúsculas cantidades de luz. Detectamos incluso respuestas cuando la fluencia era cuatro veces menor de la que pensábamos constituía el umbral para las respuestas a baja fluencia. Parecía que estas últimas se componían de una respuesta a baja fluencia, en sentido estricto, y un segundo tipo de respuestas, que denominamos a muy baja fluencia. Se demostró que las respuestas a muy baja fluencia no las revertía la luz del infrarrojo cercano. Las respuestas clásicas a baja fluencia (tales como la germinación de semillas de lechuga) son bastantes reversibles. Es más, podía desencadenarse la respuesta a muy baja fluencia con la cantidad de energía contenida en un solo destello de luciérnaga. Las clásicas respuestas a baja fluencia requerirían en su umbral 10.000 de tales destellos, o la energía en un segundo de luz de luna.

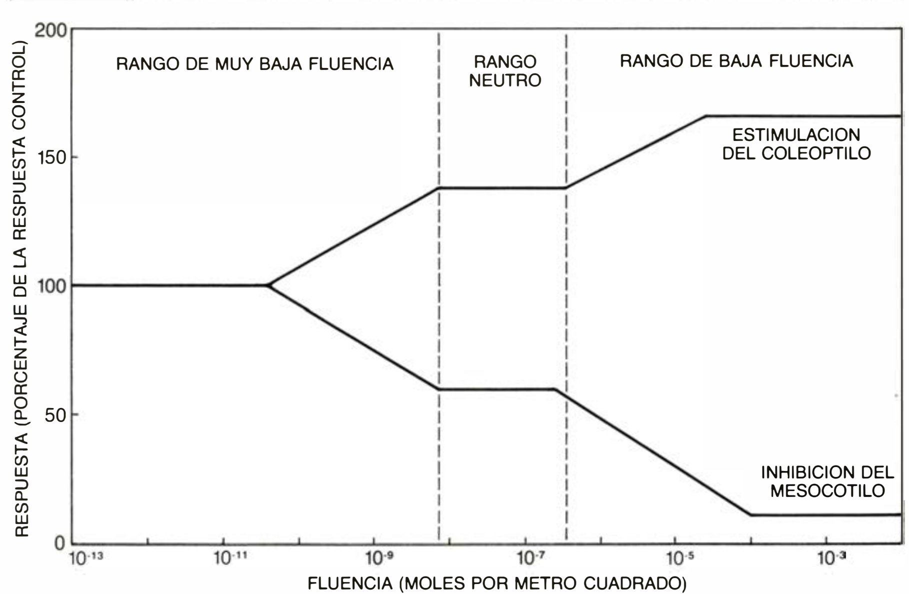
Finalmente, calculamos que las respuestas a muy baja fluencia comenzaban cuando sólo un 0,01 por ciento del fitocromo de la planta estaba bajo forma P_{fr} y se saturaban cuando se hallaba en tal forma alrededor del 0,5 por ciento del fitocromo. Puesto que hasta las luces infrarrojas más puras proporcionan alrededor del 3 por ciento del fitocromo en forma P_{fr}, nada tiene de extraño que las respuestas a muy baja fluencia no sean reversibles por luz del infrarrojo cercano y que, en efecto, pueda inducirlas la propia luz infrarroja. El umbral para las respuestas de baja fluencia es alrededor del 2 por ciento; su saturación se consigue al 87 por ciento.

A raíz de estos descubrimientos se pensó que los tejidos vegetales se comportarían como fibras ópticas. Sólo pretendíamos localizar el sitio de la fotorrecepción en plantas etioladas. Desde los años 20 hasta los 40 varios grupos de investigadores habían puesto su empeño en ello. Protegían partes de la planta de la luz y valoraban el crecimiento subsecuente de la planta entera o de partes de la misma. Las respuestas a la luz en el rango de baja fluencia siempre se mostraban superiores cuando se irradiaba el nodo. Este resultado se ajustaba con exactitud a la distribución del fitocromo en la planta. Como demostró en 1963 uno de nosotros (Briggs), trabajando con Harold W. Siegalman, y, más tarde, Robert E. Hunt y Lee H. Pratt, de la Universidad de Vanderbilt, el fitocromo se encuentra en todos los tejidos de la plántula de avena, pero abunda más en el nodo y en el extremo del coleóptilo. Estas células contienen 10 veces más fitocromo que las células de los tejidos adyacentes.

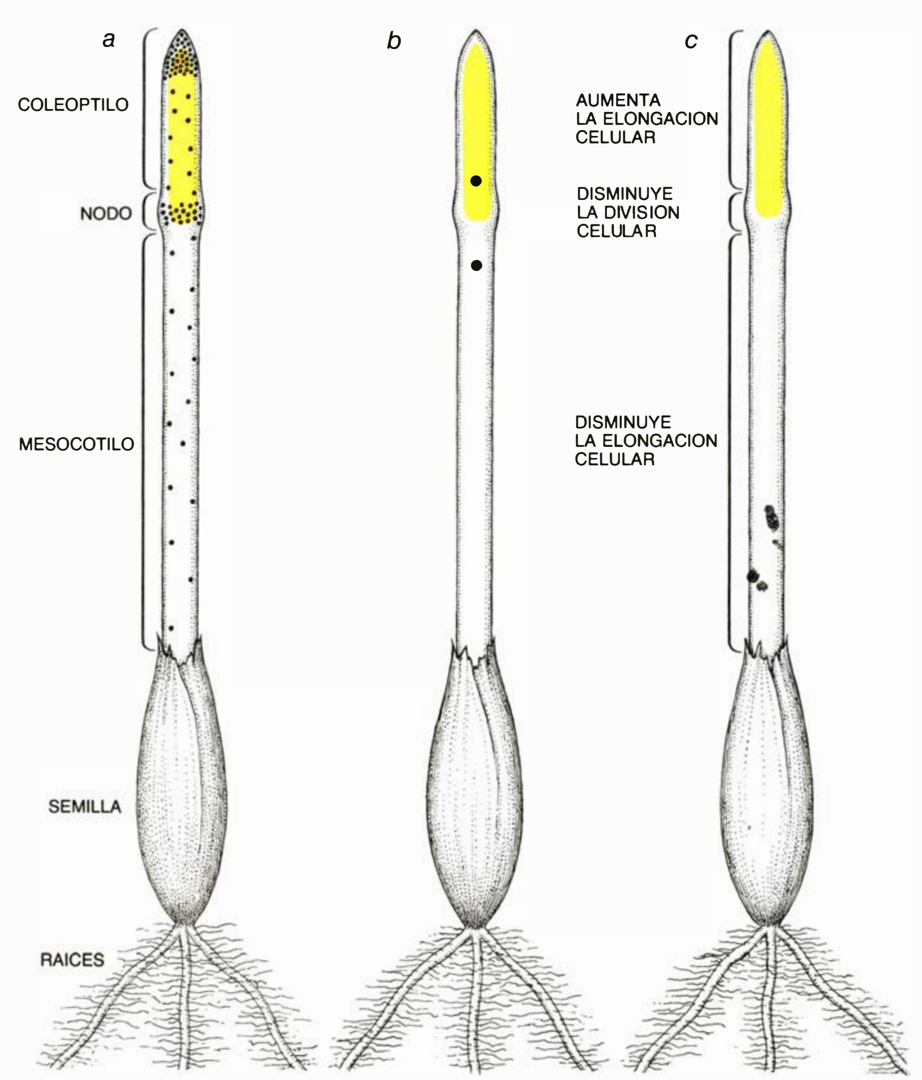


3. **ESTRUCTURA de una plántula de avena, ejemplo típico de la estructura de muchas herbáceas. El tallo que emerge de la semilla comprende el mesocótilo, o tallo primario, y el cilindro hueco denominado coleóptilo, que envuelve las hojas fotosintéticas inmaduras. El mesocótilo se une al coleóptilo por una pequeña protuberancia, el nodo, de la que surgen paulatinamente nuevas hojas.**





4. **RESPUESTAS A BAJA FLUENCIA de una planta, que ilustran la modulación del modelo de crecimiento de esa planta inducida por pequeñas cantidades de luz; parte de la modulación responde a muy bajas cantidades de luz, lo que los autores denominan respuestas a muy baja fluencia. La figura ofrece dos respuestas de ésas: el crecimiento del mesocótilo, inhibido por la luz, y el crecimiento del coleóptilo, instado por la luz. La escala vertical representa la cantidad de respuesta cifrada en el porcentaje de la respuesta de una planta que crece en completa oscuridad. La escala horizontal detalla las cantidades de luz roja, minúsculas. Por ejemplo, una fluencia de 10^{-9} moles de fotones por metro cuadrado corresponde a la cantidad de luz que una luciérnaga emite en un único destello. (Esquemas de Tom Prentiss.)**



5. PRIMER INDICIO de la fotoconducción por tejidos vegetales. Se presentó en el estudio de la distribución del fitocromo en plántulas de avena (*a*), tras su comparación con los sitios de la planta que mostraban mayor sensibilidad a la luz (*b*): las zonas cuya iluminación provocaba la máxima respuesta a baja fluencia. De tal comparación deducíase que la planta era capaz de conducir luz. Las respuestas de las plántulas a la luz (cambios en la elongación y proliferación celulares) se dan también en otros puntos (*c*).

Obviamente, no había información sobre las respuestas a muy baja fluencia. Repetimos entonces el experimento, irradiando pequeñas porciones de una hilera de plántulas de avena cultivadas en oscuridad. En ambos rangos de respuestas, a baja y a muy baja fluencia, obtuvimos unos resultados sorprendentes. Esperábamos encontrar un máximo de respuesta cuando la luz afectara al nodo o al extremo del coleóptilo. No ocurrió tal. La máxima respuesta se producía cuando la luz afectaba al tejido adyacente al nodo. Una posible explicación era que la luz viajara hacia las áreas que no se habían irradiado intencionadamente. Dado nuestro método de actuación, el único paso posible era a través de la propia planta.

En su mayor parte, los tejidos son malos transmisores de la luz. Por otro lado, la conducción de luz en tejidos vivos no es ningún fenómeno desconocido. La luz se guía en los conos y bastones del ojo de mosca; contribuyen tanto a la sensibilidad de la visión como a la percepción del color. En las hojas, la capa de células que forman el mesófilo puede guiar la luz, y así aumentar la cantidad de luz aprovechable para la fotosíntesis. En el oído interno de los vertebrados, las células pilosas del órgano de Corti conducen luz, pero esta guía nada tiene que ver con su función (dichas células están al servicio del sentido del oído).

¿Actúan entonces los tejidos de las plantas pluricelulares, como la avena, de verdaderos conductos de luz, esto es, de fibras ópticas? Las plantas de avena se asemejan, a grandes rasgos, a los haces coaxiales de fibras ópticas comerciales. Por un lado, las células de la plántula tienden a alinearse en columnas. Por otro, cuando la plántula se ilumina, la pared celular permanece oscura, pero el interior de la célula brilla.

Se trataba, empero, de una hipótesis difícil de demostrar. Nuestros primeros intentos se vieron obstaculizados por la necesidad de encorvar las plántulas. De no hacerlo así, parte de la corriente de luz que dirigíamos hacia el extremo del tallo pasaría directamente al fotomultiplicador que colocábamos en el otro extremo. Las plántulas medían sólo 1,2 milímetros de diámetro y se rompían fácilmente al doblarlas. No teníamos más alternativa que ir ensayando hasta mantener las plántulas encorvadas e intactas. Se presentó un segundo problema: la manipulación e iluminación de las plántulas tendía a secarlas; con la deshidratación, disminuía la capacidad de conducir luz a través de los tejidos. Esta disminución es un método muy útil y seguro de medir las pérdidas de agua en tejidos vegetales vivos, como John S. Boyer, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y posteriormente nosotros, hemos constatado. De entrada, no obstante, la deshidratación constituía un contratiempo.

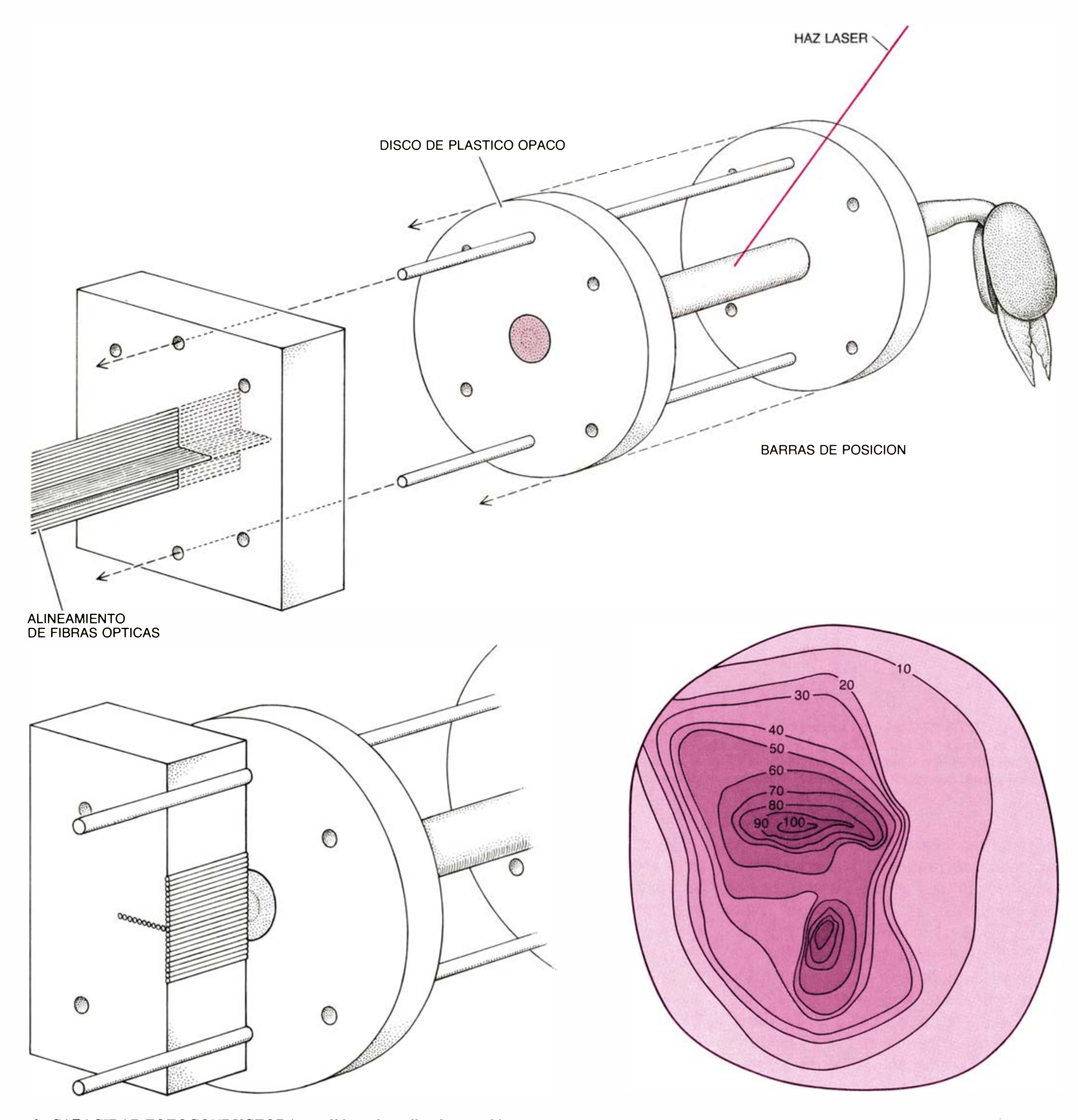
Los láseres que producen luz de longitudes de onda visibles no generan la irradiación infrarroja, responsable en parte de la desecación del tejido. Así, un láser de helio-neon de baja potencia satisfizo nuestras necesidades admirablemente. Suministraba una corriente de alta fluencia, sin daños secundarios, a una longitud de onda cercana al pico de absorción del fitocromo en el rojo. Bajo tal iluminación, los tallos de avena, centeno y garbanzo conducen la luz, aunque con diversa eficacia. Por fin logramos detectar sin problemas el transporte de luz a través de fragmentos de 4,5 centímetros de tejidos de plantas que habían crecido en oscuridad.

Podíamos ya comparar las propiedades de las plántulas con las de las fibras ópticas comerciales. Aunque doblemos una fibra óptica, prosigue en su función fotoconductora, mas no porque la luz se incurve en el interior de la fibra, sino porque rebota repetidamente en la superficie interna de ésta, describiendo en su avance una ruta en zigzag. En cada punto de reflexión, la luz toca la interfase entre la fibra y el medio que la rodea. Bajo circunstancias normales, parte de la luz se reflejaría y parte escaparía, aunque según un ángulo distinto. Es decir, parte se reflejaría y parte se refractaría; ahora bien, para un particular ángulo de incidencia, llamado ángulo crítico, la parte refractada de la luz se dirige a lo largo de la interfase. De ello se deduce que para valores de ángulo que excedan el crítico no escapará luz de la fibra; toda ella se refleja.

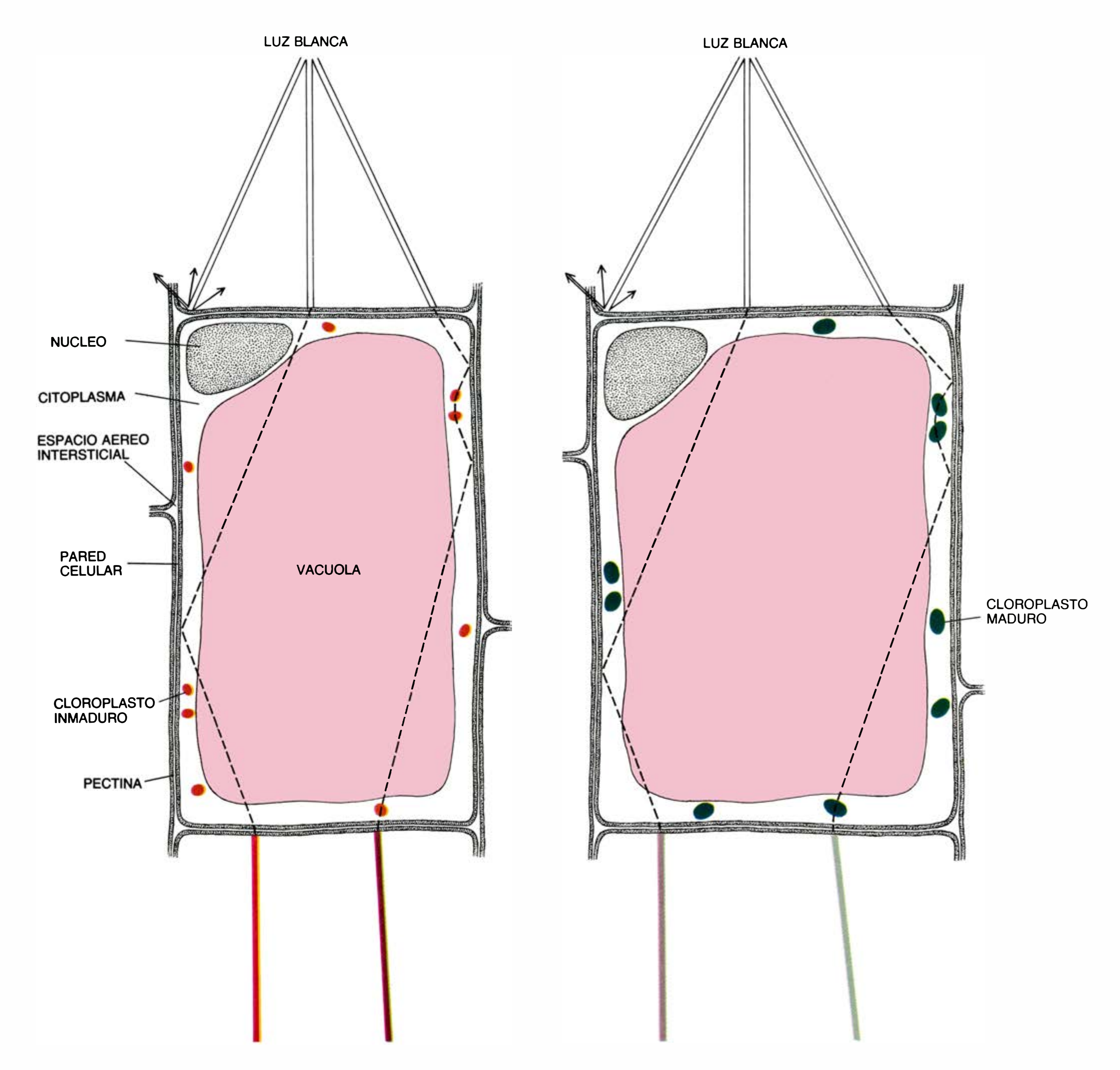
La fibra se comporta, entonces, como una guía de luz; tiene la propiedad de "reflexión interna total".

La reflexión interna total requiere, primero, que el índice de refracción del medio que guía la luz (una medida de la velocidad de la luz en el medio en cuestión) sea mayor que la del medio que lo rodea; en segundo lugar, que la interfase entre ambos medios sea lisa. Consideremos, pues, un haz de bandas de fibras ópticas y supongamos que el índice de refracción del medio que rodea al haz puede alterarse hasta igualarlo al del medio conductor de luz de cada una de las bandas. Solamente las bandas del perímetro del haz perderían su propiedad fotoconductora. Las otras, más profundas en el haz, mantendrían una interfase eficaz. Si el haz se redujera a una sola fibra, de mayor diámetro, al igualarse los índices de refracción se anularía toda su capacidad conductora. Supongamos ahora que se corta un haz de fibras ópticas, cuan largas son, en dos haces iguales. Cada uno conduciría la mitad de la cantidad de luz que transportaba el haz entero. Por el contrario, el corte de una fibra aislada de diámetro ancho volvería áspera la única interfase del sistema y, por tanto, eliminaría su facultad fotoconductora. Todos los tejidos de plantas ensayados se comportaron, en ambos aspectos, como si fuesen haces plurifibrilares.

Las fibras ópticas presentan otra peculiaridad más: la cantidad de luz atrapada en un medio conductor de luz depende del ángulo con el que la luz que



6. CAPACIDAD FOTOCONDUCTORA, medida en los tallos de una plántula de garbanzo por medio de luz láser y un haz de fibras ópticas comerciales. El aparato alinea el extremo cortado del tallo con una sección del haz de fibras, de 0,25 milímetros de diámetro cada una. A la izquierda, abajo, se muestra una representación más detallada del alineamiento; a la derecha, el modelo de luz que emerge del tejido. La luz se conduce de una forma coherente, esto es, conservando bastante el modelo geométrico a medida que se aleja del punto de irradiación, señal de que la imagen no se mezcla en el trayecto.



7. PASO DE LA LUZ a través de diversos compartimentos de columnas de células en plantas de remolacha; se dedujo de la absorción de luz a ciertas longitudes de onda por pigmentos contenidos en distintas zonas de las células. En una planta inmadura de remolacha (*izquierda*) se comprueba que la luz atraviesa el citoplasma y la vacuola de las células. La vacuola, una cisterna intracelular, contiene los pigmentos antocianina y betacianina. En plántulas expuestas a la luz (*derecha*) el desarrollo de los cloroplastos reduce la transmisión de luz y altera su espectro, prueba de que la luz atraviesa el citoplasma.

llega desde el exterior de la fibra incide sobre la interfase. La luz quedará atrapada por la fibra si llega a la interfase con un ángulo igual o superior al ángulo crítico. En las fibras ópticas artificiales, el ensayista sigue una estrategia simple: extrae una fibra del haz y mide directamente su ángulo crítico. Procedimiento que no es aplicable en tejidos, donde parece que las unidades conductoras de luz son columnas de células. Una célula de avena, por ejemplo, alcanza unos 0,08 mm de diámetro y 0,1 mm de longitud. Además, la cara cortada de un órgano vegetal consta de células dañadas, que dispersan la luz.

Ante la imposibilidad de medir el ángulo crítico de elementos individuales de fibras ópticas, decidimos determinar la relación angular entre la luz y los tejidos de la planta, dato más interesante para la fisiología que la relación en guías luminosas individuales. Esperábamos un resultado complejo, pero las plantas iluminadas con un láser a diferentes ángulos mostraron una fuerte preferencia angular. Esa conducta variaba según las especies. Llamaba la atención que semejante comportamiento no pareciera guardar relación con la geometría y el tamaño del tejido. Por recurrir a un ejemplo, las raíces de una plántula de centeno están cubiertas de pelos radiculares, el mesocótilo es un cilindro macizo regular y el coleóptilo es un cilindro elipsoidal hueco; pues bien, los tres tenían un rango de aceptación de ángulos con un máximo para un ángulo de 47 grados. (Se toma el eje longitudinal de la planta para establecer el ángulo de referencia de 90 grados.) De los diversos factores que pudieran ser responsables de la determinación de la especificidad angular no se ha estudiado más que el índice de refracción.

Y vayamos con la última propiedad del haz de fibras ópticas: transmite fiel-

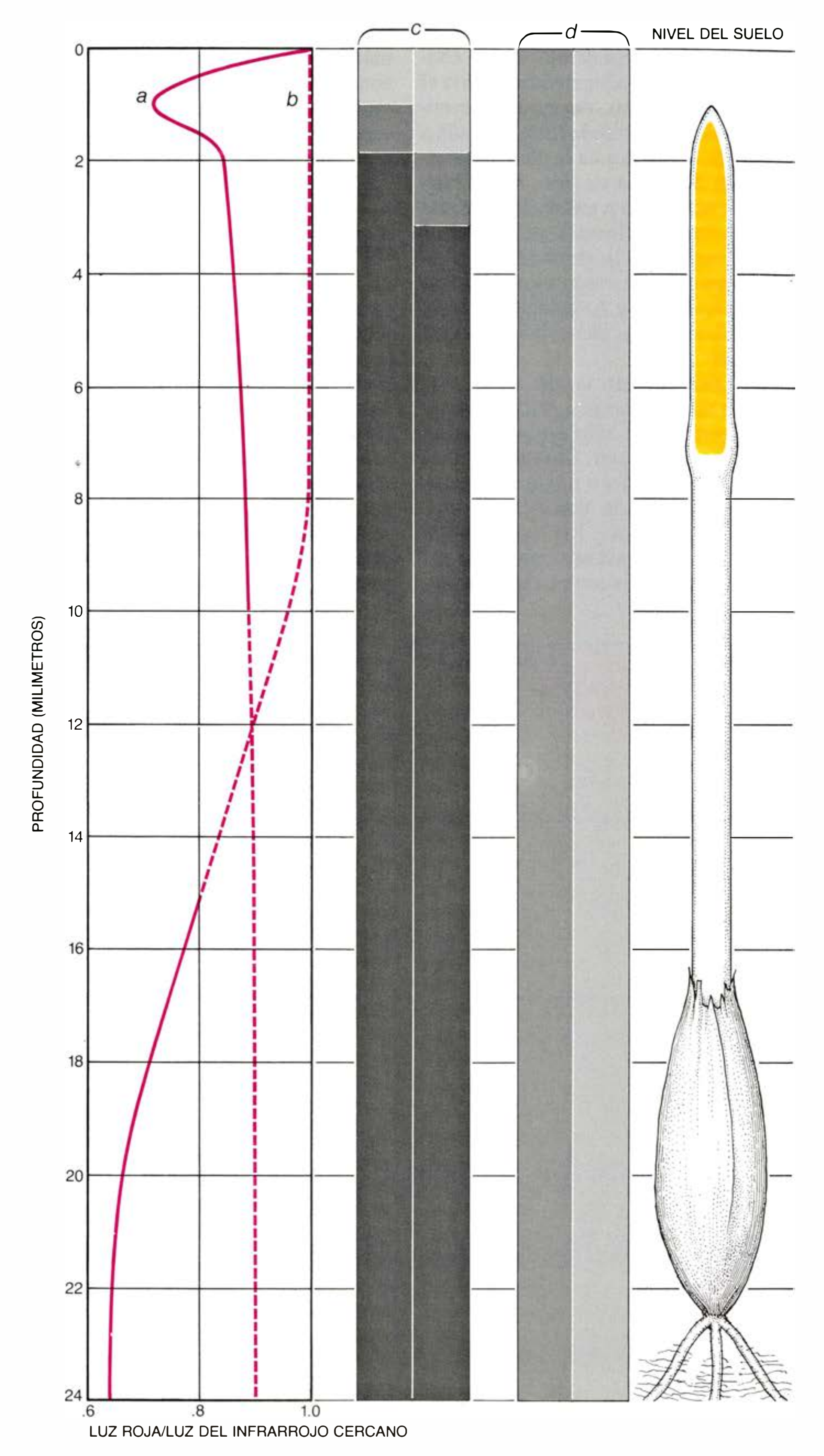
mente una imagen si las fibras son coaxiales. En caso contrario (esto es, si las fibras están entrelazadas), la imagen se mezcla en el tránsito. La primera de esas situaciones se conoce por coherencia; por incoherencia, la segunda. Nuestras mediciones demuestran que los tejidos de plantas que han crecido en oscuridad cuyas células son largas y completamente regulares se comportan a menudo como transmisores coherentes de imágenes. Son capaces de transmitir figuras simples de láser.

La luz que guían desde el punto de irradiación los tejidos configurados como haces de fibras ópticas coherentes puede ejercer efectos fisiológicos distintos de los producidos por la luz en los puntos de irradiación.

Consideremos, por ejemplo, el fototropismo; en particular el hecho de que la luz azul que incide sobre el extremo del coleóptilo de avena o de centeno provoca el crecimiento de las plantas hacia la fuente de luz. Desde principios de siglo se ha supuesto que el tropismo responde a que incide más luz sobre la superficie de la planta expuesta a la fuente lumínica. Sin embargo, nuestras mediciones demuestran que en realidad la cantidad de luz conducida hacia la cara opuesta de la planta puede ser dos o tres veces mayor que la conducida por la cara que recibe la luz. El extremo del coleóptilo está compuesto por bóvedas de células. Razonamos que la luz tendía a entrar en esas bóvedas según un ángulo bastante cercano al de máxima aceptación, de 47 grados. Quizá la mayor parte de la luz se guíe a lo largo de las bóvedas hasta la cara opuesta de la planta.

La cualidad espectral de la luz conducida a través de los tejidos vegetales reviste, a su vez, gran importancia. En este orden, un cambio en el componente rojo de la luz que entra en una célula puede producir un cambio en la razón entre las longitudes de onda roja e infrarroja de la luz, lo que, a su vez, alteraría el estado del fitocromo de la célula. Se instaría, probablemente, una modulación del crecimiento celular. Por ejemplo, cuanto más baja fuera tal razón, tanto más rápidamente tendería el tallo a elongarse.

¿Qué es lo que cambia el espectro de la luz guiada a través de un tejido vegetal? En primer lugar, los pigmentos de las propias células vegetales. En células de hojas de arce y en las nervaduras de hojas de remolacha, la vacuola, una amplia estructura intracelular con aspecto de cisterna, contiene pigmentos rojos y púrpura, como antocianina y betacianina. La clorofila, verde, y los



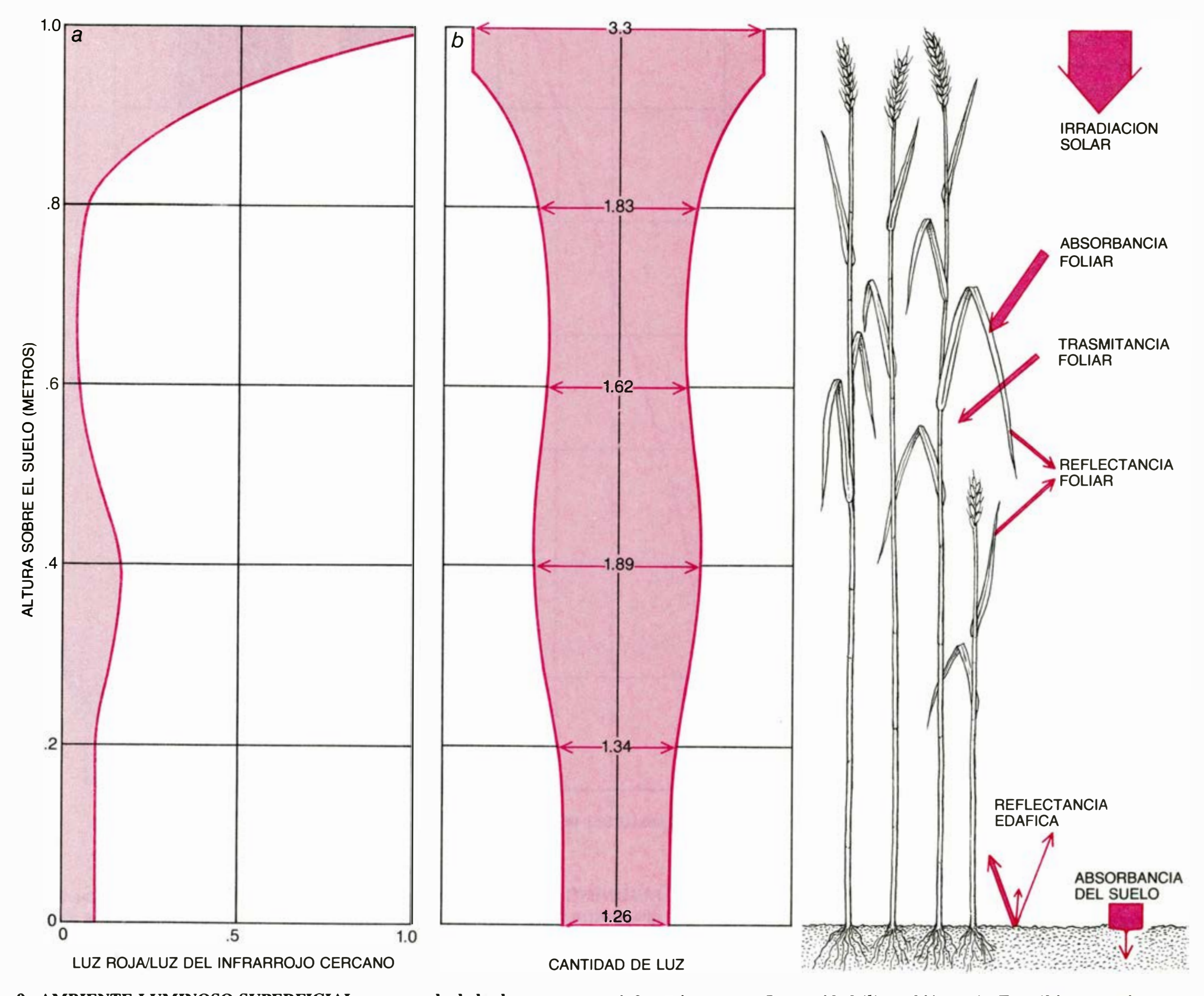
8. AMBIENTE LUMINOSO SUBTERRANEO que encuentra una planta: depende de la extensión con que la luz solar que penetra en el suelo se recoja en el interior del vegetal. A la izquierda se ilustra la cualidad espectral de la luz del sol (en particular la razón de rojo a infrarrojo cercano) al aumentar la profundidad en un suelo arenoso (*a*) y en una plántula de avena (*b*). Además, la cantidad de luz se representa según una gama de grises: gris claro donde la cantidad de luz es suficiente para producir respuestas a baja fluencia y gris oscuro donde puede producir respuesta a muy baja fluencia. Un par de barras (*c*) muestra la situación en el suelo; el otro (*d*) las condiciones en el interior de la planta. Cada par está dividido verticalmente; la mitad izquierda corresponde a un segundo de luz solar en la superficie; a 10 minutos, la mitad de la derecha. Basta un segundo de luz solar para desencadenar respuestas a muy baja fluencia en plántulas de avena, aunque las semillas germinen a una profundidad de 20 mm.

carotenoides, naranja, se albergan en el citoplasma circundante. Cierta concentración de tales pigmentos tendría el efecto de un filtro, de modo que midiendo el espectro de la luz conducida a través de los tejidos de la planta sabríamos por dónde ha viajado. Así lo hicimos en luz guiada a través de plántulas de remolacha cultivadas en oscuridad; quedó manifiesta la absorción de luz a las longitudes de onda características de antocianinas y betacianinas. Parte de esa luz pasaba, pues, por el sistema vacuolar.

Expusimos luego las plántulas a la luz. No tardaron en desarrollar orgánulos fotosintéticos: fabricaron clorofilas y se volvieron verdes. El espectro de la luz conducida ahora a través de la planta mostraba nuevas absorciones debidas a las clorofilas y los carotenoides. Parte de la luz atravesaba, pues, el citoplasma. En plantas completamente verdes, la absorción de luz reducía a un margen muy estrecho la cantidad de luz conducida y limitaba las longitudes de onda de esa luz a la zona infrarroja del espectro. La significación de este fenómeno para el fitocromo de plantas maduras está aún por determinar.

Volvamos de nuevo a las herbáceas y a su notable capacidad para situar el nodo justo debajo del plano del suelo, independientemente de la profundidad a la que hayamos enterrado la semilla. Un conocimiento cabal del fenómeno requeriría indudablemente un dominio absoluto de las propiedades de transmisión de luz, no sólo de la planta, sino también del suelo. Por sorprendente que parezca, apenas se conoce nada de ello. Con la colaboración de Lawrence Waldron y M. Nemson, de la Universidad de California en Berkeley, recogimos datos sobre la transmisión de luz por diferentes tipos de suelos. En arenas y margas, la cantidad de luz transmitida depende de la hidratación y del tamaño de las partículas edáficas. También la cualidad cambia; el pico de transmisión del espectro sufre un "desplazamiento azul" y, con él, se produce un complejo cambio en la razón rojo a infrarrojo a medida que profundizamos o disminuye el tamaño de partícula.

Por mor de simplificación, ciñámonos a una semilla enterrada que (a diferencia de la de lechuga) no requiera luz para germinar. La gravedad guía su desarrollo; el tallo crece hacia arriba, penetrando secuencialmente en los diversos ambientes creados por el suelo. Las células no sólo sufren ahora el efecto de su ambiente local, sino también el de la luz guiada hasta ella a través del interior de la planta. Supongamos que la semilla se entierra en una marga arenosa de California a una profundidad



9. AMBIENTE LUMINOSO SUPERFICIAL; comprende de hecho un complejo abanico de ambientes creados por las interacciones entre la luz, por un lado, y el suelo y el dosel de la planta, por otro. En la figura, un campo de trigo. La cualidad de la luz (*a*) varía marcadamente con la altura sobre el suelo. También aquí se representa la cualidad según la razón entre luz roja e infrarroja cercana. La cantidad (*b*) también varía. Esta última se estima mediante una escala logarítmica en la que 3,3 representa la luz solar recibida en el extremo superior de la planta. En concreto equivale a 2×10^{-3} moles de fotones por metro cuadrado y por segundo. Datos tomados de las observaciones realizadas por M. G. Holmes y H. Smith, de la Universidad de Leicester.

de unos 20 milímetros. En el ambiente que encuentra primero el extremo del coleóptilo la cantidad de luz corresponde al rango de muy baja fluencia y, la cualidad de la luz, expresada como la razón entre rojo e infrarrojo, es aproximadamente de 0,9. La luz puede transmitirse dentro de la planta sin apenas atenuación ni cambios esenciales de cualidad en distancias de unos 8 milímetros. En principio, la plántula se está irradiando hasta el extremo de sus raíces. Incluso bajo excelentes condiciones de crecimiento, transcurrirán horas enteras antes de que el ápice de la planta alcance la superficie y se exponga directamente a la luz del sol. La conducción de luz, por tanto, proporcionaría a la planta un intervalo temporal durante el cual comenzaría a desarrollar los tejidos foliares y la maquinaria bioquímica que necesitará para la fotosíntesis.

El ambiente luminoso de una planta que ha crecido en la oscuridad es mucho más simple que el de una planta verde en su pleno desarrollo. La planta madura vive en un amplio abanico de ambientes. Obtiene luz del sol, y sombra parcial, en su ápice; en su propio dosel, le alcanza sombra y también luz solar directa, junto con luz y radiación infrarroja reflejadas desde el suelo. Finalmente, bajo tierra, sus raíces, que pueden representar más de la mitad de la masa de la planta, no reciben luz solar directa. Incluso allí la planta madura pudiera responder a la luz. Hemos comprobado, por ejemplo, que algunas de las raíces del centeno se encuentran prácticamente horizontales en oscuridad, pero pueden crecer incurvándose hacia abajo con ángulos de entre 30 y 50 grados si las exponemos a luz roja. Tal vez la cantidad y cualidad de la luz transmitida a través del suelo sea detectada por las raíces, que utilizarían esa información para obviar la superficie del suelo, en su crecimiento radial, recabando agua y nutrientes.

Los cincuenta años transcurridos desde que se descubrió el papel informativo de la luz para las plantas han conocido esfuerzos tesoneros por desentrañar la compleja fisiología en que intervienen los pigmentos vegetales, fitocromo incluido. Nuestros resultados corroboran el convencimiento de que las propiedades ópticas condicionan su fisiología. Nos toparemos aún con muchas sorpresas. Es de esperar que se traben conexiones entre tres aspectos del problema: la física de la luz en los vegetales (física de las fibras ópticas), conversión de la luz en señales químicas y efecto de tales fenómenos sobre la biología de la planta.

Manipulación mecánica de partes aleatoriamente orientadas

Constituye uno de los principales obstáculos para la introducción generalizada de los robots en la industria. El ordenador "ve" ya un objeto encima de una bandeja de piezas entremezcladas y dirige su brazo mecánico para asirlo

Berthold K. P. Horn y Katsushi Ikeuchi

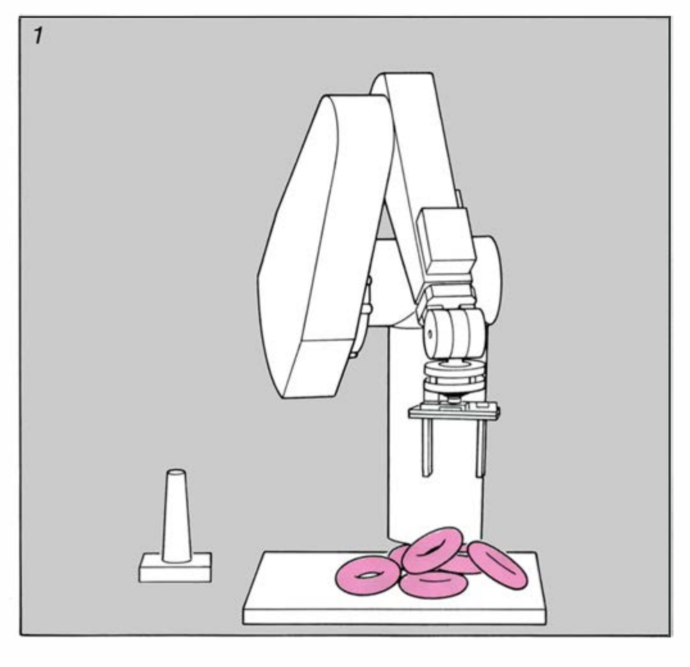
Considérese la fina coordinación entre el ojo y el brazo de un infante que está alcanzando una pasta de una bandeja. Aunque las pastas son aproximadamente iguales en tamaño y forma, las que sobresalen del montón forman un sinfín de pistas visuales, una topografía abrupta de la que el niño extraerá suficiente información para determinar qué parte del campo visual o táctil debe asignarse a la única pasta que tiene por objetivo. Mientras aprende a tomar una pasta sin romper o aplastar las que se encuentran alrededor de la que desea, el niño comienza a darse cuenta de que no vale cualquier orientación de la mano. Por ejemplo, asir el borde de la pasta entre el dedo pulgar y el índice resulta solamente si el centro de la pasta está sobre, o cerca de, la línea que une los dos puntos sobre los que se está haciendo presión. Una estrategia mucho más fiable consiste en determinar visualmente la disposición, u orientación, de la pasta y, entonces, girar la mano hacia una de las posiciones que mejor permitan agarrarla. Recogida por fin la pasta de una forma u otra, el niño debe transformar las coordenadas espaciales del dulce que corresponden a la mano en las coordenadas que corresponden a la boca.

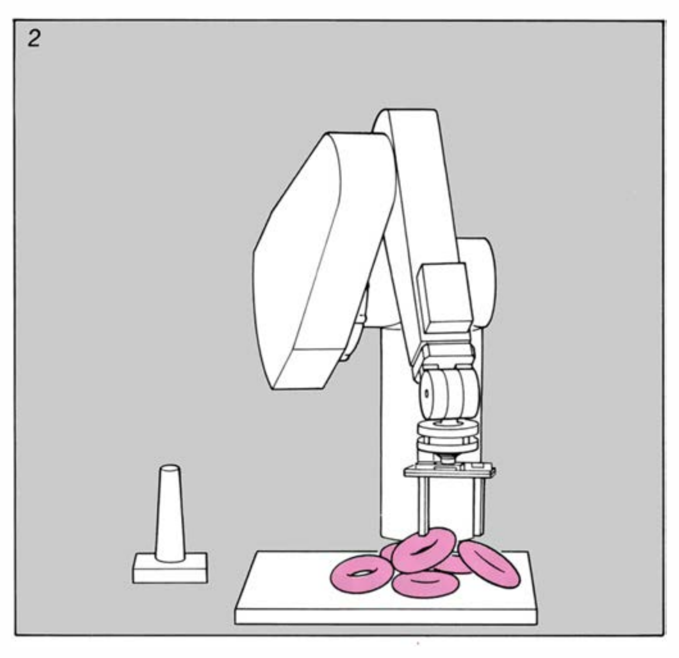
Hasta hace poco tiempo, tal conjunto de complicadas acciones coordinadas trascendía la capacidad de la maquinaria que pretendía simular algunas tareas del obrero industrial. El robot que hallamos hoy en las fábricas se reduce, fundamentalmente, a una máquina de simple repetición de movimientos espaciales. Para llevar a cabo su labor, atraviesa un período de "aprendizaje" con una persona experta en la tarea. Se guía el "brazo" del robot a través de una serie de movimientos; la secuencia de configuraciones del robot necesarias para seguir al "maestro" se registra en una cinta o en cualquier otro dispositivo de memoria. Cuando se reproduce la cinta, ésta dirige al robot para que ejecute la misma secuencia de movimientos. La habilidad del robot para registrar movimientos espaciales la han intentado, sin éxitos notables, los coreógrafos para obtener un registro continuo de los movimientos de la danza. Sin embargo, los robots de repetición de movimientos han encontrado un lugar en la industria: muchas tareas se repiten tanto que pueden realizarse como una secuencia de movimientos fijos. En este sentido, los manipuladores mecánicos se han aplicado en soldadura por puntos, alimentación de máquinas, labores de pintura, soldadura de bordes, sellado y otros muchos trabajos repetidos o peligrosos.

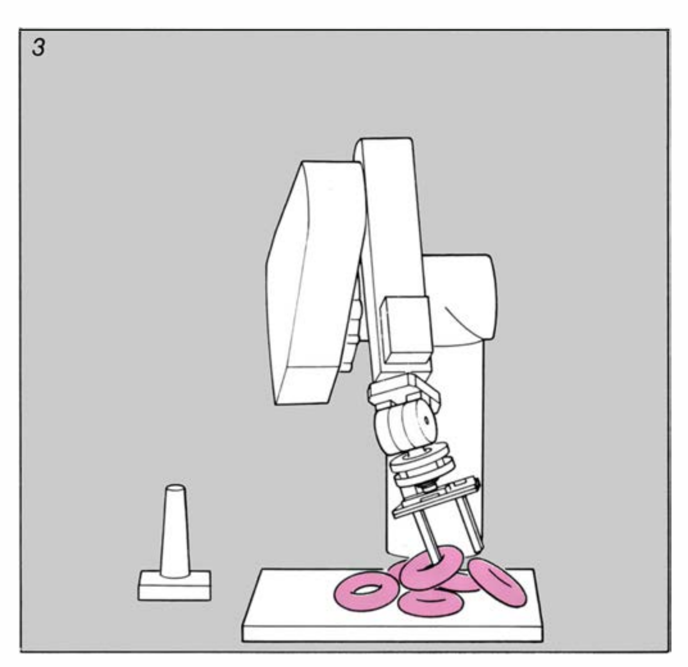
En una fábrica hay muchas tareas imposibles de acomodar en una rutina fija de movimientos. En ensamblaje manual, por ejemplo, es corriente tener las piezas almacenadas en bandejas o cestas junto al puesto de trabajo. Allí, el robot de repetición "ciego" resulta prácticamente inservible; sólo tolera imprecisiones muy pequeñas en la posición de la pieza que debe agarrar. Una solución obvia del problema sería evitar amontonar las piezas en el primer puesto, o dicho de otra forma, mantener controlada la orientación desde el momento en que se han fabricado. Los fabricantes se muestran proclives a optar por esta solución; las piezas pueden colocarse en cajas o en cintas transportadoras, donde puedan manipularse mecánicamente sin necesidad de detectarlas antes. Pero se trata de una solución que tiene sus costos. Las cajas o las cintas transportadoras deben diseñarse y manufacturarse muy a menudo con tolerancias muy pequeñas. Es más, las cintas transportadoras son normalmente muy pesadas, ocupan mucho espacio y han de someterse a nueva adaptación cuando se modifica la pieza que transportan. Hasta el propio diseño de la pieza deberá modificarse, quizá para facilitar la alimentación automática. Sirva esto de ejemplo para comprender que existen muchas circunstancias en las que el volumen de producción no presenta al fabricante suficientes incentivos económicos para salirse de los métodos manuales tradicionales.

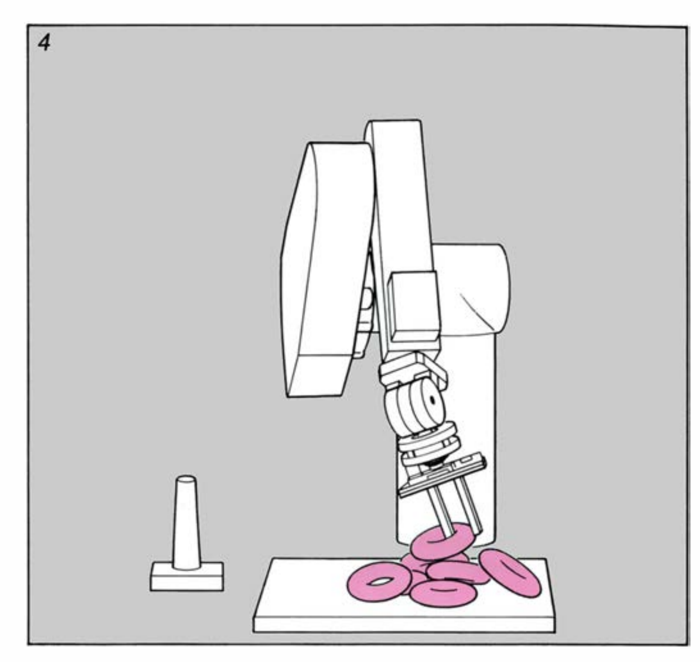
Hemos desarrollado un sistema computarizado que determina la posición de una pieza dotada de forma arbitraria en una pila de ellas distribuidas al azar. Este sistema requiere sólo unas cuantas imágenes electrónicas del montón de piezas. El ordenador transforma matemáticamente las imágenes en una forma que es inmediatamente comparada con un modelo matemático de la pieza, que está almacenado en la memoria del ordenador. Este gira el modelo matemático hasta que se adapta a la disposición del objeto que se desea asir. Los resultados se utilizan para dirigir un brazo mecánico que recoge el objeto. Este método sensorial tan flexi-

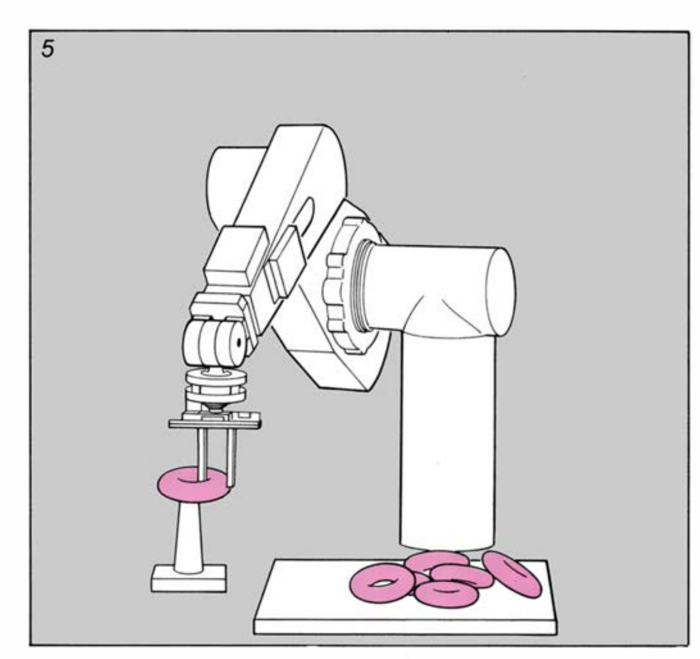
1. MOVIMIENTO DE UN ROBOT que selecciona un objeto entre un puñado de ellos, representado en una serie de dibujos basados en fotografías realizadas por los autores. El objeto, de forma toroidal, se asemeja a una rosquilla y es difícil de reconocer y asir para la mayoría de sistemas controlados por ordenador. La orden que dirige el brazo a lo largo de una línea en el espacio se basa en la información suministrada por tres imágenes recogidas mediante una cámara electrónica. Un programa de ordenador determina la identidad y la orientación de un objeto y, a continuación, busca la región que corresponde al mismo dentro del plano imagen. El programa selecciona también el punto por donde el robot debe alcanzar el objeto. Cuando un haz de rayos infrarrojos que cruza de un lado a otro de la tenaza de la mano es interceptado, se interrumpe el movimiento de la mano a lo largo de la línea. La tenaza maniobra entonces para colocarse en una posición adecuada y asir el objeto, se cierra luego y lo levanta limpiamente.

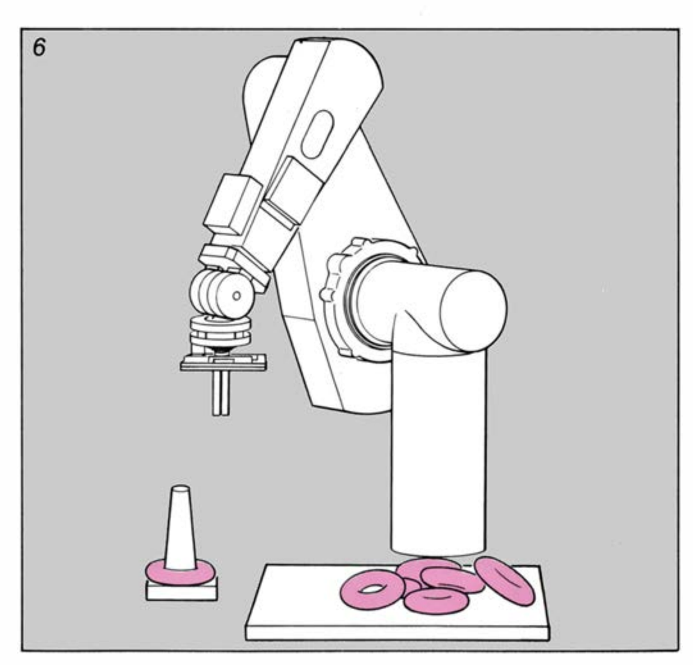

1

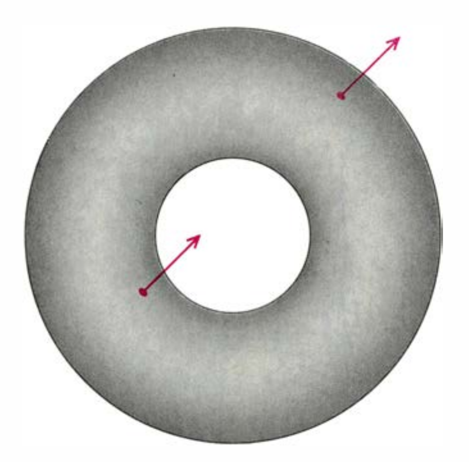

2

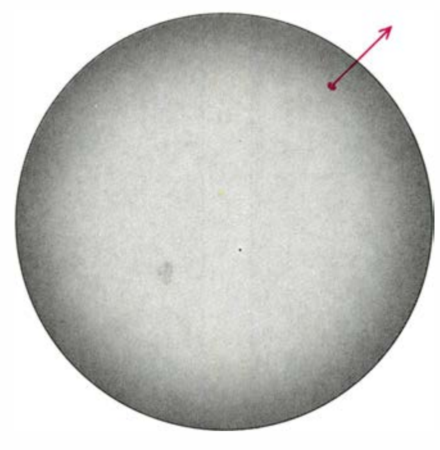

3


4


5


6





2. LA ORIENTACION DE UNA SUPERFICIE en un punto viene dada por la dirección perpendicular al plano tangente a la superficie en ese punto (*izquierda*). Puede representarse por las coordenadas de un punto con la misma orientación sobre la superficie de una esfera de radio unidad, denominada esfera de Gauss (*derecha*). La orientación puede definirse para cualquier punto que no esté situado en un pliegue o en un vértice de la superficie. En la pieza toroidal, más de un punto pueden tener la misma orientación.

ble permite ampliar sustancialmente el campo de aplicación de los robots industriales.

No somos, desde luego, los inventores del sistema sensorial aplicable a la dirección de los movimientos de una máquina. Más. La primera fase de nuestro procedimiento la comparten otros muchos tipos de máquinas de visión: registro de una imagen digitalizada de un objeto en el plano focal de una cámara electrónica. El plano focal, o plano imagen, consta de múltiples pixeles, o elementos de imagen, dispuestos en una estructura regular. La luminosidad del objeto, que se denomina nivel de grises, se mide para cada una de las áreas que se corresponde con un pixel en el plano imagen. Los valores de la luminosidad son cuantificados y redondeados a uno de los 256 niveles de gris.

En casos especiales, basta con calcular ciertas propiedades del objeto a partir, directamente, de la imagen cuantificada en la matriz. Así, en determinadas situaciones, se distinguen puntos de la imagen, que corresponden al objeto de nuestro interés, de otros puntos que no lo son. Tal partición entre el objeto y su entorno se basa en las diferencias de luminosidad. La imagen resultante se denomina imagen binaria, porque cada pixel representa uno de los dos posibles estados del objeto: su presencia o su ausencia. La imagen binaria de un objeto recuerda, en su textura teórica, los dibujos que se forman en una línea de luces de una carpa circense o en un tablero de puntuación de un estadio.

El procesamiento de las imágenes binarias puede hacerse con equipos de alta velocidad, sin excesivo costo. Por desgracia la imagen binaria es frecuentemente una representación demasiado burda para servir de guía en la manipulación automática de objetos. Si la forma de la imagen binaria debe parecerse, siquiera sea levemente, a la silueta del objeto real, el contraste entre la luminosidad del objeto y la del fondo tendrá que ser bastante intenso. Si hay más de un objeto dentro del campo de visión no se solaparán ni tocarán; si los objetos no están separados en el plano imagen de la cámara, las siluetas pueden cambiar en un sentido imprevisible y las líneas generales de la imagen binaria no tener nada que ver con la figura real del objeto en cuestión. Es más, a menos que el objeto posea cierta simetría de rotación, la silueta del mismo puede modificarse de una manera muy complicada cuando se gira en cualquier plano que no sea paralelo al plano imagen. La información recogida por la imagen binaria de un objeto dispuesto de forma arbitraria es, en general, demasiado variable para que se ajuste a la representación del objeto almacenada en la memoria del ordenador.

Se ha progresado considerablemente en la visión mecánica desde los ensayos de los primeros procesadores de imágenes binarias en el laboratorio, hace unos 15 años. Pero no se ha vencido el reto que plantea la misma cuestión fundamental sobre el diseño de tales sistemas. ¿Cómo recuperar una representación simbólica del mundo tridimensional a partir de una imagen cuantificada en escala de grises y registrada por una cámara electrónica? La forma y el detalle exigidos en tal descripción dependen de la aplicación concreta. Para recoger objetos dispuestos de forma aleatoria en un cesto, la descripción debe dar, únicamente, la identidad, la posición y la disposición de los objetos en el espacio.

Corre la opinión de que la identidad, posición y disposición de una pieza se infieren sin mayor dificultad de nuestro conocimiento de la topografía tridimensional de la cima del montón de piezas. Pero no hay tal inferencia directa. Eso sí: el primer paso que hay que dar para obtener una descripción sigue siendo el estudio de la topografía de las piezas. La clave perceptiva más conocida para recuperar la topografía tridimensional a partir de imágenes bidimensionales es la percepción de profundidad que proporciona la visión estereoscópica. Podemos ver en profundidad gracias, en parte, a que poseemos dos ojos que forman imágenes desde puntos de vista ligeramente distintos. Muchas máquinas de visión tratan de sacarle partido al método estereoscópico, pero son lentas, complejas y caras; además, sólo pueden tratar ciertos tipos de imágenes.

Para sus aplicaciones prácticas, las máquinas de visión no tienen que emular la admirable capacidad de la visión sensible. De ahí que hayamos decidido adoptar la estereofotometría, un método inventado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts por Robert J. Woodham. El método determina la orientación de la superficie de cada pequeña zona superficial de un objeto; no da la distancia absoluta a un punto del objeto. Ahora bien, para la segmentación, identificación y búsqueda de la disposición de un objeto en el espacio necesitamos sólo la orientación de superficies locales.

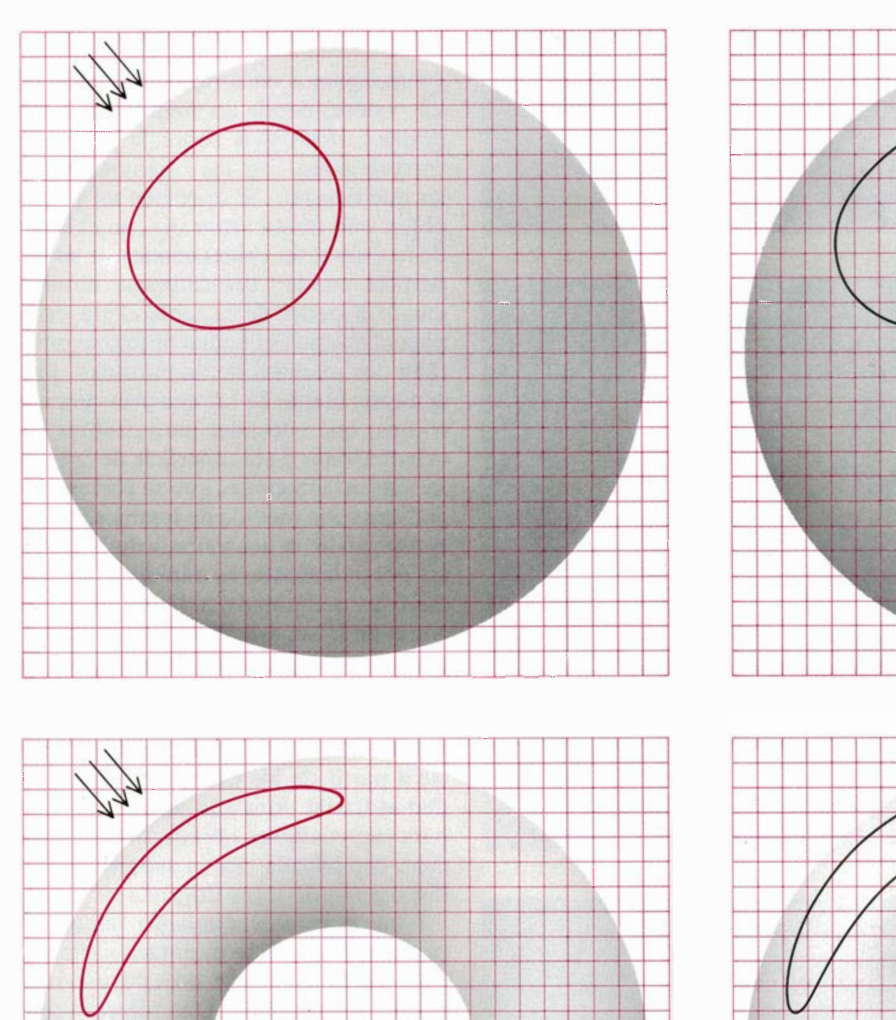
La orientación de una superficie en cualquier punto (salvo un punto de pliegue o en un vértice) se define por la dirección de una línea perpendicular al plano tangente a la superficie en el punto. Cualquier orientación posible se corresponde con la orientación de algún punto de una esfera: cada punto de la esfera tiene una orientación distinta. La línea que proporciona la orientación de un punto en una superficie arbitraria es, por tanto, paralela a la línea que da la orientación de algún punto de la esfera. Se sigue también que cualquier orientación espacial puede especificarse dando dos coordenadas; a saber: la latitud y la longitud de un punto de una esfera de radio unidad, denominada esfera de Gauss en honor de Carl Friedrich Gauss.

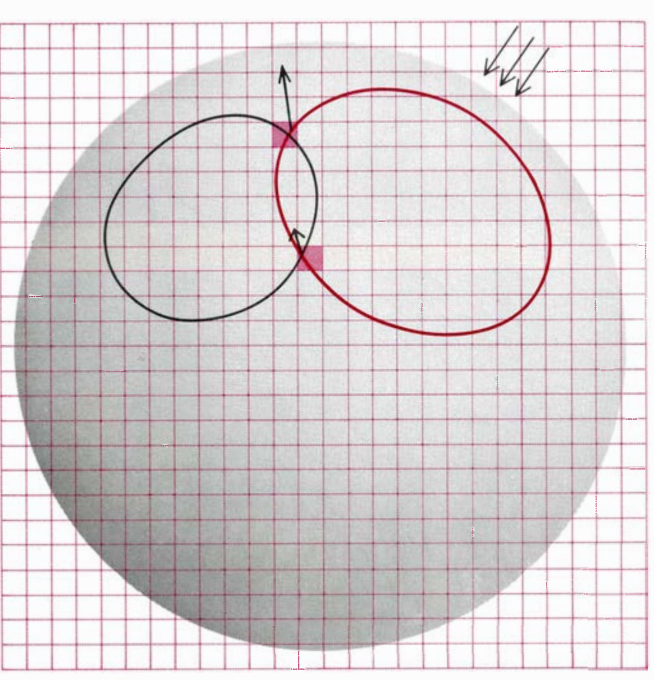
Supongamos una esfera de Gauss iluminada por una fuente remota de luz. Supongamos, además, que el material de la superficie de la esfera refleja toda la luz incidente y aparece igualmente brillante desde cualquier punto de observación. Puesto que la fuente de luz se encuentra alejada, la distancia entre un punto de la esfera y la luz no varía

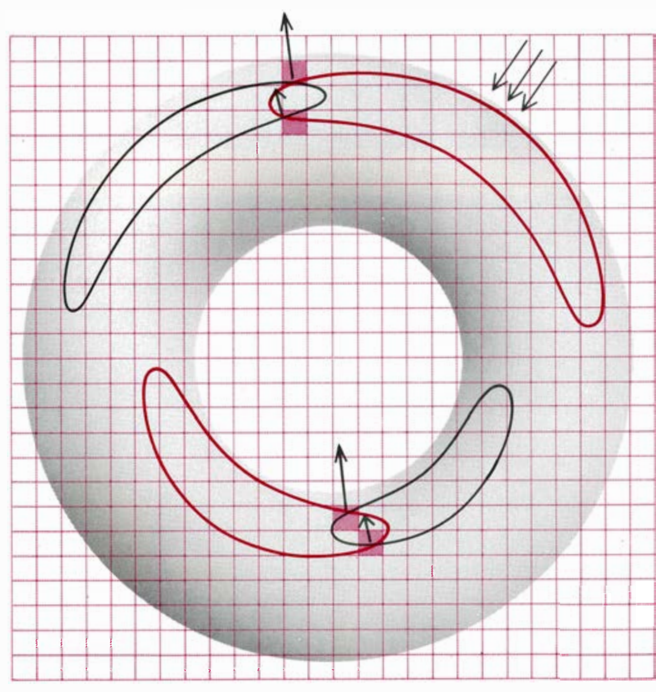
apreciablemente con la posición del punto. La cantidad de luz capturada y reflejada por una pequeña zona de la superficie de la esfera depende sólo del área aparente de la zona tal como se ve desde la fuente de luz. El área aparente depende, a su vez, de la inclinación de la zona con respecto a la luz.

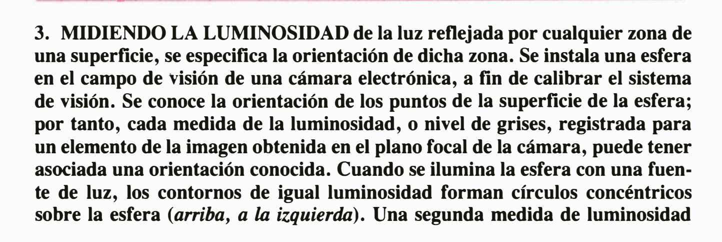
Puesto que se supone que la luminosidad de la superficie esférica no varía con la dirección en que se la ve, la parte más brillante de toda la superficie, para cualquier observador, es la zona que rodea el punto donde la orientación de la superficie coincide con la dirección de la luz incidente; dicho con otras palabras, el punto hacia el que la fuente de luz está dirigida. La luminosidad de la superficie remite con la distancia al punto más brillante medida sobre la superficie esférica. Las zonas de igual luminosidad forman anillos concéntricos alrededor del punto más brillante, puesto que el ángulo de inclinación de todas respecto a la luz es el mismo.

Si se apaga la primera luz y se enciende otra segunda más distante, las zonas visibles de la superficie esférica se agrupan en anillos de igual luminosidad centrados en un segundo punto. Cualquier zona de la superficie de la esfera que pueda recibir iluminación de ambas luces tiene asignados, por consi-

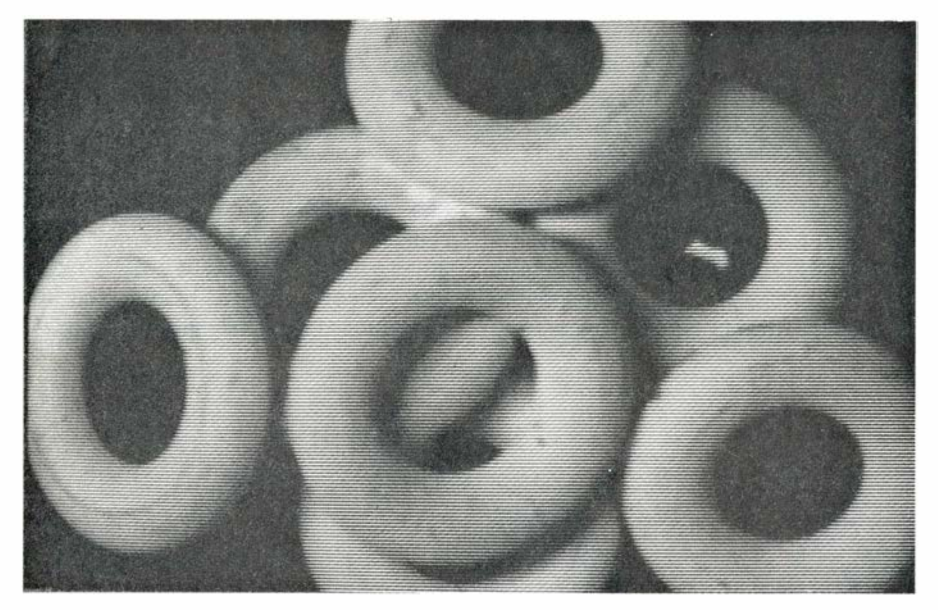


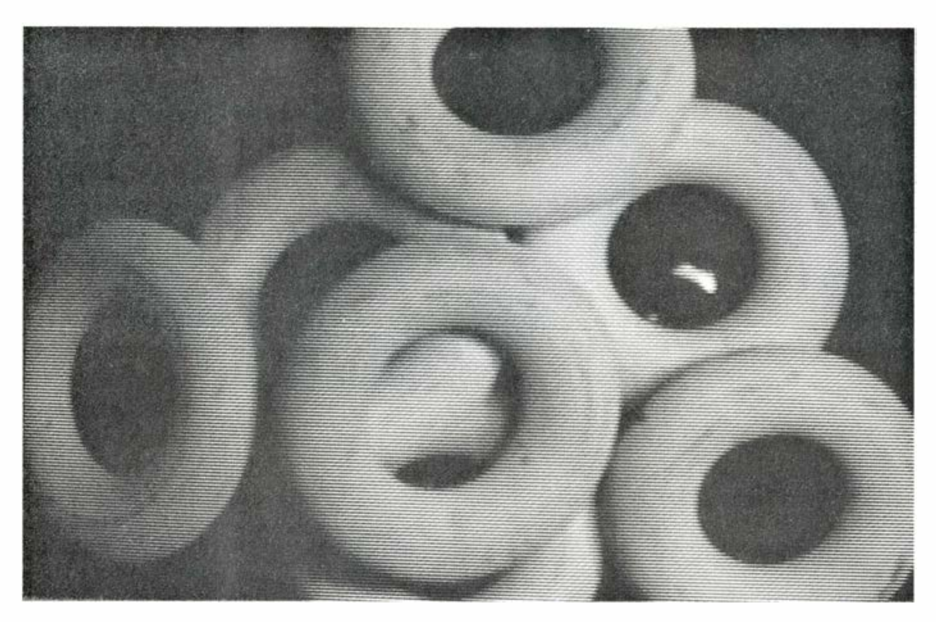


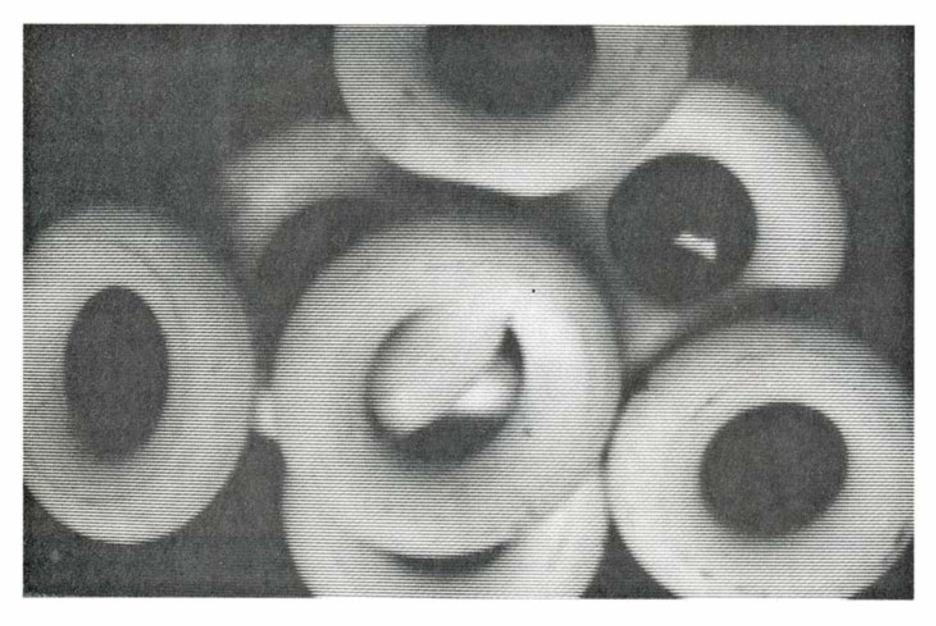




3. MIDIENDO LA LUMINOSIDAD de la luz reflejada por cualquier zona de una superficie, se especifica la orientación de dicha zona. Se instala una esfera en el campo de visión de una cámara electrónica, a fin de calibrar el sistema de visión. Se conoce la orientación de los puntos de la superficie de la esfera; por tanto, cada medida de la luminosidad, o nivel de grises, registrada para un elemento de la imagen obtenida en el plano focal de la cámara, puede tener asociada una orientación conocida. Cuando se ilumina la esfera con una fuente de luz, los contornos de igual luminosidad forman círculos concéntricos sobre la esfera (*arriba, a la izquierda*). Una segunda medida de luminosidad con otra fuente situada en una dirección diferente produce un segundo conjunto de círculos concéntricos (*arriba, a la derecha*). Ambas mediciones especifican un par de niveles de grises para cada elemento de imagen. Únicamente dos pequeñas zonas de la esfera, que se corresponden con los dos elementos de imagen en los que intersecan ambos círculos, pueden tener el mismo par de niveles de grises. Una tercera medición suministra una orientación única de la zona de la superficie de la esfera. Cuando se efectúan las mismas mediciones con un objeto desconocido, la orientación de una zona de su superficie se infiere de esta escala calibrada de grises (*figuras inferiores*).







4. LUZ REFLEJADA por una pila de objetos dispuestos aleatoriamente, para tres fuentes de luz situadas en distintas direcciones. Las diferencias en el sombreado para una misma zona de la superficie son difíciles de apreciar por el ojo, pero los sensores electrónicos logran detectarlas de forma inmediata.

guiente, dos valores de luminosidad, uno por cada fuente. El primer valor limita las posiciones posibles de la zona a un círculo centrado en un punto, justo debajo de la primera luz; el segundo valor asigna la zona a un segundo círculo, con un centro diferente. Los círculos pueden intersecarse, en no más de dos puntos, sobre la superficie de la esfera. Por tanto, a un par de niveles de grises le corresponderá, como máximo, un par de puntos en la esfera; o en otras palabras, dos orientaciones.

Supongamos construida una tabla de valores donde las medidas de luminosidad efectuadas sobre la esfera se corresponden con las orientaciones a las que ocurren. Si se coloca un nuevo objeto, de forma arbitraria, en el lugar de la esfera, las orientaciones de su superficie pueden determinarse directamente a partir de la tabla. Para cada pequeña zona del nuevo objeto se efectúan dos medidas de luminosidad, una con cada fuente de luz que previamente se tuvo que encender para calibrar las orientaciones de la superficie de la esfera. Las orientaciones que se corresponden con cada medida de luminosidad se leen a partir de los valores de la tabla. El procedimiento es rápido, pues las medidas de luminosidad para todas las zonas de la superficie del nuevo objeto pueden obtenerse simultáneamente de dos imágenes y la manipulación de datos requerida para determinar la orientación de cada zona de la superficie a partir de los valores de luminosidad es trivial. Más aún, el método rige para casi cualquier objeto, sin importar cuán complicada sea su superficie o la disposición de luces utilizada.

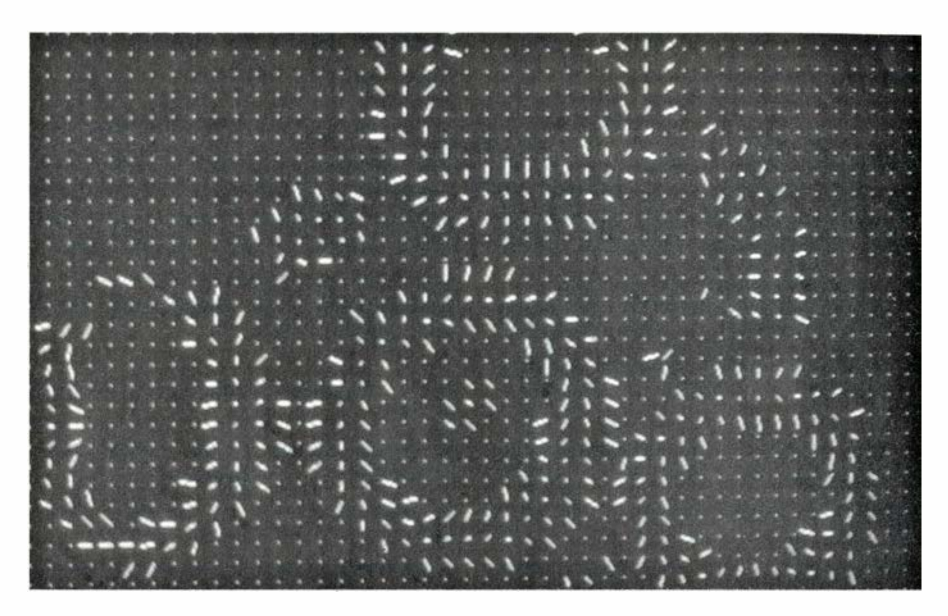
Con este procedimiento surge un problema obvio: la orientación de una zona de la superficie no está unívocamente determinada. Una tercera fuente de luz puede suprimir esta ambigüedad remanente, pero la información que suministra es mucho mayor que la necesaria para distinguir las dos orientaciones. En vez de contentarse con este exceso, se pueden explotar las tres fuentes de luz para recabar mayor información acerca de las propiedades de la superficie. Por ejemplo, si la superficie refleja sólo una fracción de la luz incidente, y si esta fracción, que se denomina albedo de la superficie, varía de un punto a otro, cada una de las tres mediciones de luminosidad realizadas origina una ecuación de tres variables; a saber: las dos coordenadas y el albedo de cada punto de la superficie de la esfera. Este sistema de tres ecuaciones puede resolverse para las tres variables siempre que las tres luces y el objeto

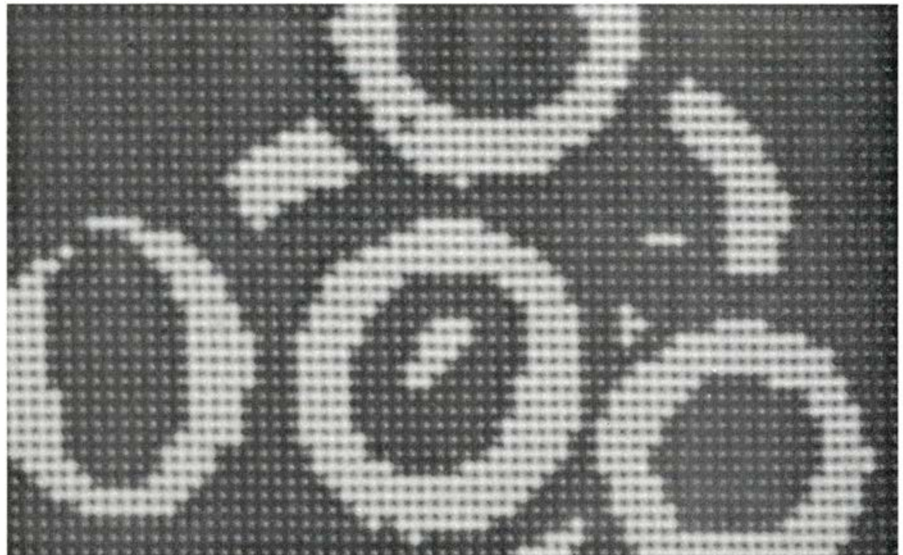
iluminado no estén todos en el mismo plano.

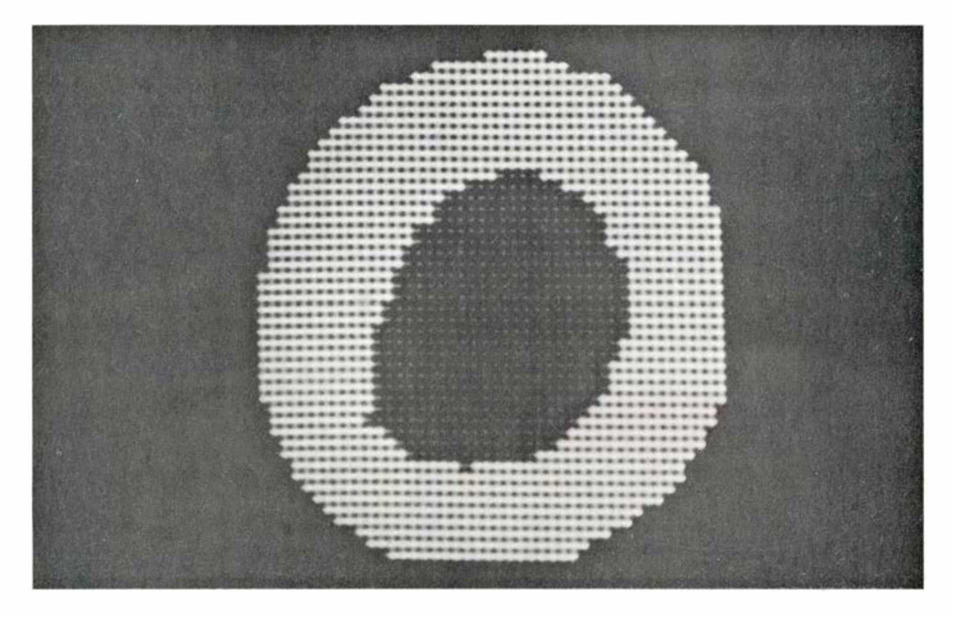
Si las medidas de luminosidad de cada pixel de la cámara se redondean a 16 valores, por ejemplo, habrá 16^3, es decir, 4096 combinaciones posibles de valores de luminosidad para cada pixel cuando la luminosidad se mida para las tres fuentes de luz. Sin embargo, la mayoría de las combinaciones no se recogerán en la tabla. Por ejemplo, ninguna de las orientaciones de la superficie de la esfera se corresponderá con la combinación en la que los tres valores de luminosidad sean máximos, a menos que las tres fuentes de luz incidieran sobre la superficie en la misma dirección. En este caso, sin embargo, no se podría definir unívocamente las orientaciones de la superficie mediante las variaciones de la iluminación. Las combinaciones de luminosidad ausentes de la tabla no son detectadas, en absoluto, por la cámara sobre ningún pixel; combinaciones "imposibles" que quizá fueran de gran utilidad en la segmentación de la imagen, división en regiones que corresponden a distintos objetos.

Motivo de combinaciones anómalas de luminosidades es la sombra que sobre un objeto pueden proyectar otros de la pila. Una forma elemental de detectar sombras es suponer que los niveles de grises cuya oscuridad rebasa cierto umbral, en al menos una imagen, señalan la existencia de una sombra. Una segunda causa de combinaciones anómalas de luminosidad es la iluminación mutua, la reflexión de luz de un objeto sobre otro; fenómeno bastante común cuando objetos de gran albedo se encuentran frente a frente. Supondremos que, si los niveles de grises brillan más que los umbrales de sombra, la mayoría de las combinaciones observadas que no se encuentren en la tabla se originan en la iluminación mutua. Estos efectos suelen aparecer cerca de los bordes de los objetos y a lo largo de los límites, donde los objetos tienden a oscurecerse entre sí, lo que puede aprovecharse para la segmentación de imágenes. Buscamos también discontinuidades en la orientación de la superficie y grandes inclinaciones de superficies, tendiendo ambas a señalar regiones donde un objeto oscurece a otro.

Una vez identificado el objeto de interés en el campo de visión, nos aprestamos a poner en correspondencia el objeto observado con uno de los objetos prototipo que está representado de forma abstracta en la memoria del ordenador. Cuando se consiga dicha correspondencia, el objeto observado estará identificado. Los únicos datos







5. EL DIAGRAMA DE AGUJAS (*arriba*) representa la orientación de las zonas de superficie sobre el montón de objetos mostrados en las fotografías de la figura precedente. La orientación correspondiente a cada elemento de imagen de la cámara está dada por la dirección de una aguja, o segmento de recta de longitud constante. Las agujas se muestran como si estuvieran clavadas en la superficie formando angulo recto, cual púas de un erizo, y vistas desde la cámara. El ordenador se encarga de dividir la imagen en sectores conexos (*centro*); uno de estos sectores se aísla para su procesamiento posterior (*abajo*).

disponibles para efectuar ese ajuste son, sin embargo, la posición y la orientación de las zonas de la superficie del objeto en cuestión. Información que puede representarse construyendo una línea perpendicular a la superficie del objeto en cada punto que se corresponda con el centro de uno de los pixeles en que se ha dividido la imagen.

Supongamos que todas las líneas perpendiculares tienen la misma longitud. La forma del objeto observado puede representarse mediante la longitud y dirección de las líneas vistas en perspectiva: las líneas de las zonas de la superficie enfrentadas al observador se representan como puntos y las líneas de las zonas de la superficie que se inclinan alejándose del observador varían en longitud según el seno de la inclinación de la zona. La figura resultante se asemeja a una superficie erizada de púas; se denomina diagrama de agujas.

Desde el punto de vista del ordenador, es costoso y poco eficaz comparar el diagrama de agujas del objeto en observación con el correspondiente diagrama de agujas de un objeto prototipo. Aunque parezca extraño, resulta más eficaz no considerar momentáneamente la información que proporciona la posición relativa de las diversas zonas superficiales, para concentrarse en las orientaciones. Una representación matemática de las orientaciones, denominada imagen de Gauss generalizada, o también EGI, se construye a partir del diagrama de agujas. Los objetos prototipo se almacenan en la memoria del ordenador en una forma matemáticamente similar.

La EGI de cualquier objeto es una esfera sobre la que se representan las contribuciones relativas a cada orientación de la superficie de un objeto frente al área de la superficie considerada como un todo. Para identificar el objeto seleccionado en el campo de visión, la EGI de un prototipo gira de forma abstracta dentro del ordenador hasta que se ajusta, lo más estrechamente posible, con la EGI del objeto observado. Este mismo procedimiento se repite con cada prototipo que se tenga almacenado en la memoria. El objeto observado se hace corresponder con el prototipo que dé el mejor emparejamiento; el ajuste efectuado proporciona simultáneamente la disposición de la EGI para el objeto.

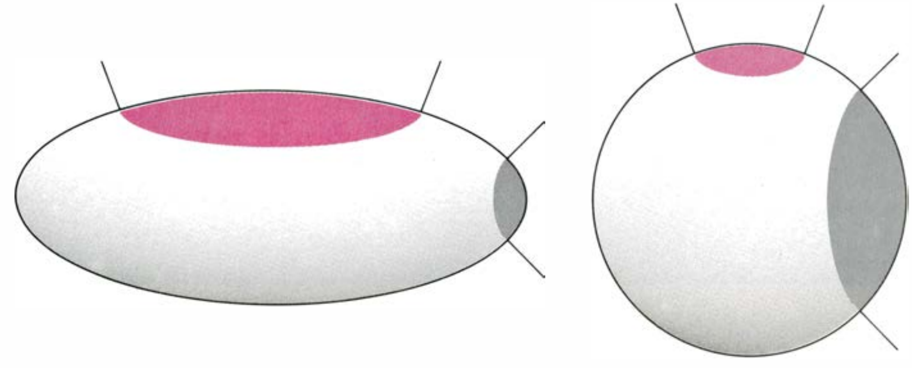
Para entender cómo se construye la EGI de un objeto, recordemos que se puede asociar cualquier punto de la superficie de un objeto con un punto de la esfera de Gauss que tenga la misma orientación. De forma similar, una zona de la superficie del objeto puede asociarse con una zona de la superficie de la esfera gaussiana haciendo corresponder cada punto del objeto con el adecuado en la esfera. Por ejemplo, siempre que la superficie del objeto se asemeje a la parte achatada de un huevo, la zona correspondiente de la esfera de Gauss cubrirá una fracción relativamente pequeña de la superficie de la esfera. Por otro lado, siempre que la superficie del objeto se curve de forma pronunciada, como el extremo de un huevo, la zona correspondiente en la esfera de Gauss será bastante extensa.

Imaginemos ahora que el huevo se recubre de una sustancia de densidad uniforme. Para construir la EGI del huevo, la sustancia de cada zona sobre la superficie del huevo se comprime o se expande de suerte tal que se ajuste exactamente a la correspondiente zona de la esfera gaussiana. La sustancia de la región achatada del huevo se comprime como una pella de arcilla para poderse ajustar a la zona relativamente pequeña de la esfera de Gauss. La sustancia del otro extremo del huevo debe extenderse para que pueda rellenar la región extensa de la esfera de Gauss. Al hacerse progresivamente más pequeñas las zonas del objeto que interesan, la densidad de la sustancia sobre la esfera de Gauss puede variar de forma continua sobre su superficie.

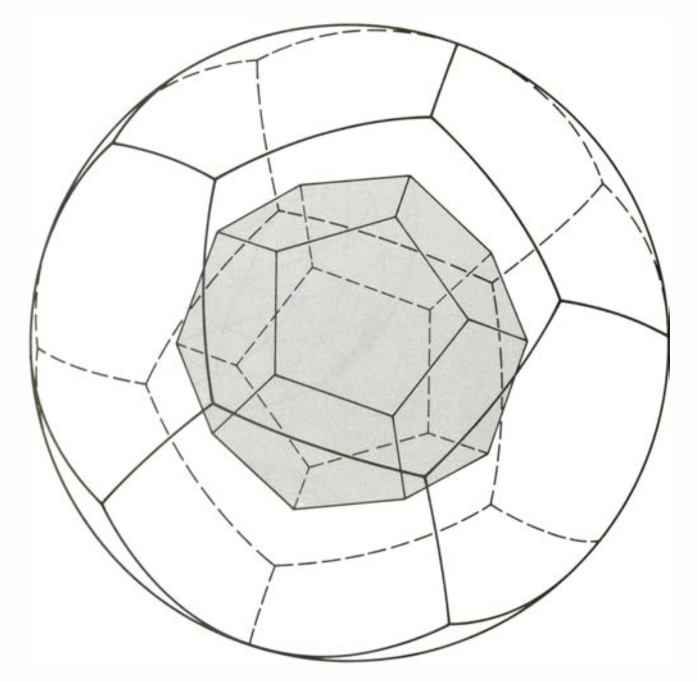
El hemisferio visible de la EGI, que se corresponde con la superficie visible del objeto observado, puede aproximarse numéricamente a partir del diagrama de agujas. La superficie de la esfera de Gauss se cuadricula, se divide en celdas; cada celda se corresponde con un pequeño rango de posibles orientaciones. Cada pixel del diagrama de agujas cuya orientación se encuentra dentro del rango de orientaciones correspondiente a una celda se asigna a dicha celda.

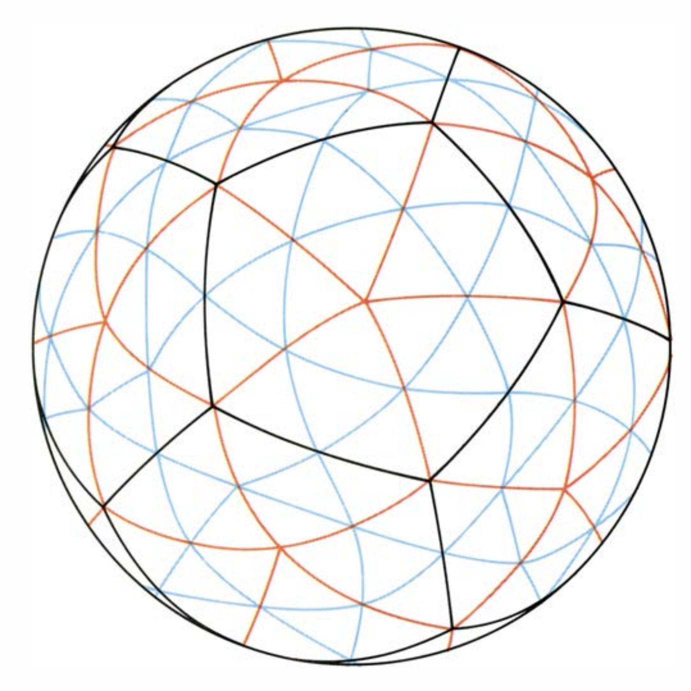
Para determinar la masa de sustancia que debe asignarse a cada celda, hay que recordar que el área de la superficie del objeto observado proyectada sobre un pixel depende de la inclinación de la superficie con respecto al observador. Una superficie que esté profundamente inclinada alejándose del observador se acorta y parece menor que vista frontalmente; efecto que puede corregirse, pues el ángulo de inclinación se conoce del diagrama de agujas. La masa de cada celda de la esfera de Gauss es entonces igual a la masa total de las partes de la superficie observada que se distinguen en los pixeles asignados a la celda. Puesto que la sustancia que recubre la superficie observada tiene una densidad uniforme, en cada zona de la superficie su masa será directamente proporcional al área. Por tanto, en cada celda la masa será también igual al área de las partes de la superficie observada correspondientes a la celda. La masa distribuida sobre todas las celdas equivale al área total de la superficie observada. La esfera de Gauss cuadriculada constituye una aproximación cuantificada, o discreta, de la EGI. Se la denomina histograma de orientación.

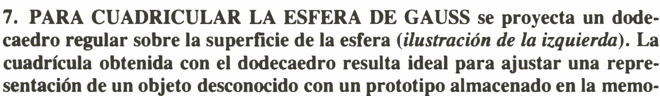
La distribución de masa en el histograma de orientación y, en consecuencia, la distribución en la EGI conducen a cierto número de resultados matemáticos que se utilizan para efectuar la correspondencia entre el objeto observado y el prototipo. El cálculo del centro de masas de cualquier hemisferio visible del histograma de orientación es inmediato. (Obsérvese que esta cantidad no tiene nada que ver con el centro de masas de la parte visible del objeto real.) Puesto que el histograma de orientación de cada objeto prototipo almacenado en la memoria del ordenador se conoce sobre la esfera de Gauss entera, puede calcularse el centro de masas para cualquier hemisferio visible



6. UNA ZONA DE LA SUPERFICIE de un objeto puede asociarse a otra zona de la superficie de la esfera de Gauss. A cada punto de la zona del objeto se le hace corresponder el punto de la esfera de Gauss que posee la misma orientación. La zona asociada de la esfera es una amplia porción de la superficie total, cuando la curvatura de la zona correspondiente del objeto es grande (*zona gris*); a su vez, la zona de la esfera es pequeña cuando la correspondiente zona del objeto es relativamente plana (*zona coloreada*).







7. PARA CUADRICULAR LA ESFERA DE GAUSS se proyecta un dodecaedro regular sobre la superficie de la esfera (*ilustración de la izquierda*). La cuadrícula obtenida con el dodecaedro resulta ideal para ajustar una representación de un objeto desconocido con un prototipo almacenado en la memoria del ordenador, aunque las 12 celdas pentagonales de la cuadrícula son excesivamente grandes. Para obtener celdas menores (*figura de la derecha*) se puede dividir cada pentágono en cinco triángulos (*rojo*); la subdivisión continúa indefinidamente si dividimos cada triángulo en otros menores (*azul*).

y almacenarse luego en memoria. Nosotros efectuamos los cálculos para cada hemisferio que resulta visible cuando una de las celdas de la cuadrícula se ve frontalmente.

Consideremos el plano que divide la esfera gaussiana en un hemisferio visible y otro que no lo es. El centro de masas del hemisferio visible se encuentra a una distancia D por encima del plano, en dirección al observador. El producto de la masa del hemisferio visible por D recibe el nombre de primer momento de la masa respecto al plano divisor. Por ser la masa del hemisferio visible igual al área de la superficie del objeto a la que corresponde el hemisferio, el primer momento equivaldrá a D veces el área de la superficie visible del objeto.

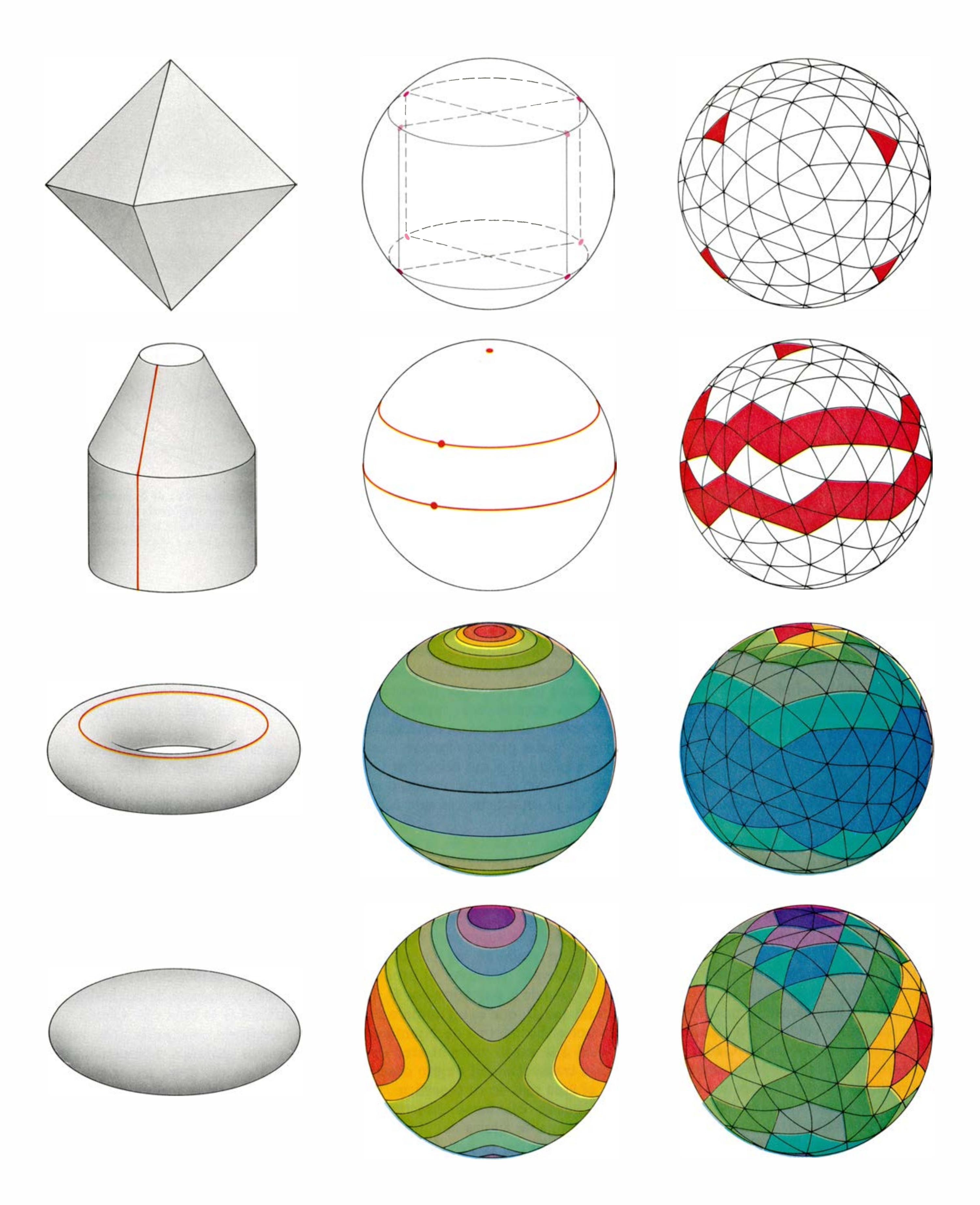
Hay otra forma de representar el primer momento de la masa del hemisferio visible. Considérese la masa asignada a cualquier celda de la cuadrícula efectuada en la esfera de Gauss. Los primeros momentos de las distintas celdas respecto al plano divisor son el producto de sus masas por sus distancias al plano. Puesto que las celdas se encuentran sobre la superficie de la esfera unidad, sus distancias al plano se calculan inmediatamente. Si la celda cae directamente frente al observador, su primer momento es igual a su masa. Si la celda está inclinada respecto al observador, su primer momento está reducido por un factor que depende de la inclinación; el factor es igual al coseno del ángulo que forman la orientación de la celda y la dirección de observación. Recuérdese que la masa de la celda es igual al área de las partes de la superficie a la que corresponde. Cuando se observan esas partes de la superficie, su área real se reduce también por el mismo coseno del ángulo entre orientación y dirección de observación. Se sigue que el primer momento de la celda respecto al plano divisor es igual al área de la sección transversal, o aparente, de la superficie a la que corresponde.

El primer momento de la masa del hemisferio completo vale la suma de los primeros momentos de todas las celdas visibles; en otras palabras, el primer momento es igual al área de la sección transversal de la superficie visible del objeto. Sin embargo, el primer momento equivale, también, al producto del área real de la superficie por D. Resulta así que D, que es un número definido por el histograma de orientación, es igual a la razón entre el área de la sección transversal del objeto observado y el área real de su superficie. Esta razón puede calcularse directamente del diagrama de agujas del objeto.

La posición del centro de masas de cualquier hemisferio del histograma de orientación determina el valor de D. Por consiguiente, la razón observada entre el área de la sección transversal del objeto y el área real de la superficie puede compararse con los valores de D asociados a varias disposiciones de los objetos prototipo. Aunque el valor de D no proporciona de forma inequívoca la disposición del prototipo que se ajusta a la del objeto observado, sí ahorra cálculos. Cualquier hemisferio del histograma de orientación para el que el centro de masas no se encuentre, al menos aproximadamente, en la posición correcta no deberá escrutarse.

En general, la disposición de un objeto puede especificarse dando la dirección de algún eje que lo atraviese y la cantidad de rotación alrededor de dicho eje. Puesto que el número de direcciones para los ejes y el número de rotaciones del objeto son ambos infinitos, no se puede comparar la EGI del objeto observado con todas las disposiciones posibles de la EGI del prototipo. El procedimiento de ajuste mutuo empleado depende del muestreo de un número finito de disposiciones de la EGI que pueden obtenerse de la cuadrícula realizada sobre la esfera de Gauss.

La cuadrícula construida debe satisfacer varios criterios independientes entre sí. Para distribuir las orientaciones de la superficie representadas por el diagrama de agujas de forma imparcial, las celdas de la cuadrícula deberían tener, en teoría, la misma área y la misma forma. Si las celdas son polígonos más o menos "redondeados" (pentágonos o hexágonos) en vez de otros con ángulos más pronunciados (triángulos), el rango de orientaciones asignadas a cada celda puede rebajarse. Más aún, es de desear que cuando se rote una celda hasta la posición anterior de otra, el resto de las celdas de la

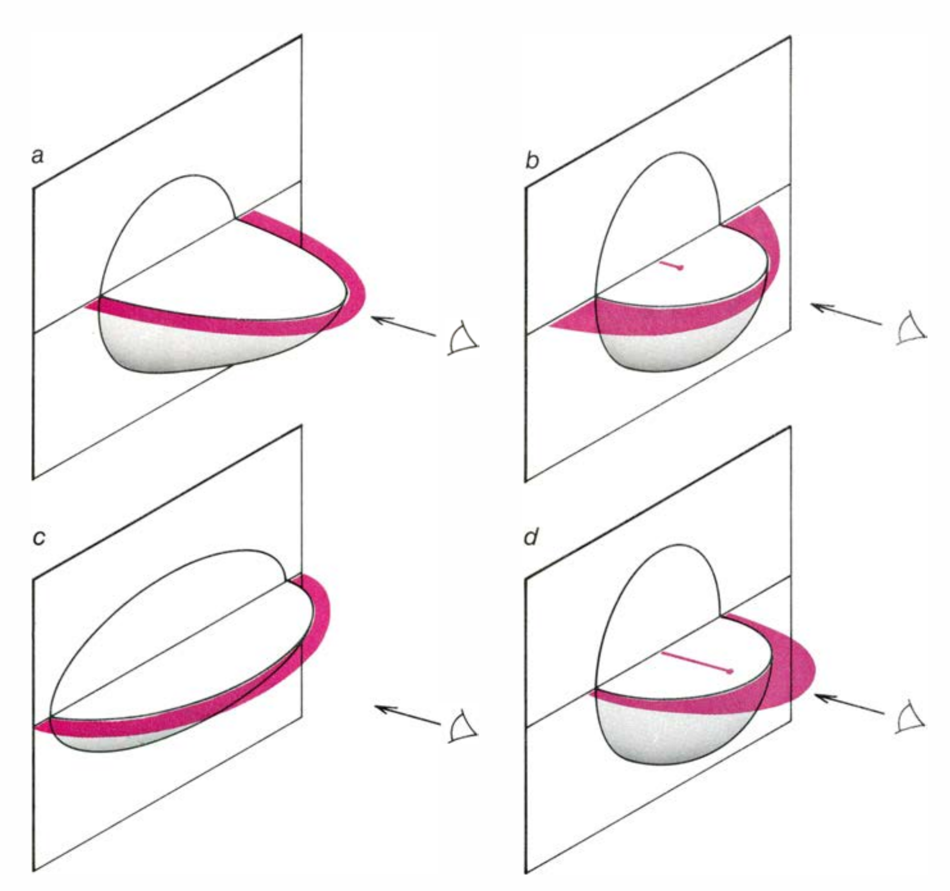


8. IMAGEN DE GAUSS GENERALIZADA de un objeto. Llamada también EGI, se representa como una distribución de materia sobre la superficie de la esfera de Gauss. En un comienzo, el material está distribuido homogéneamente sobre la superficie del objeto. Cada zona superficial de esta sustancia se traslada a la esfera, comprimiéndose o extendiéndose como si fuera una pella de arcilla para ajustarse a la zona correspondiente de la esfera. La EGI de varios objetos se muestra en la columna central de la ilustración. Las regiones de más alta densidad aparecen en rojo; las de densidades decrecientes, en naranja, amarillo, verde, azul y púrpura. Todos los puntos de la cara de un poliedro presentan la misma orientación y, por tanto, toda la materia de esa cara se concentra en un punto en la esfera de Gauss. A las superficies de un cono y de un cilindro le corresponden, a cada una, un círculo en la esfera de Gauss; una línea en el cono y una línea en el cilindro paralelas al eje de rotación poseen, cada una de ellas, un punto asociado en la esfera de Gauss. El ordenador "percibe" entonces los objetos tal como se muestran a la derecha, donde la EGI se ha cuantificado sobre la esfera de Gauss cuadriculada.

esfera de Gauss permuten sus orientaciones iniciales. Esta forma de rotar la esfera puede representarse en el ordenador permutando simplemente las masas asociadas a las celdas. Todos estos criterios se satisfacen proyectando un dodecaedro regular, que es un poliedro con doce caras pentagonales, sobre la esfera.

Desgraciadamente, con sólo doce celdas pentagonales en la esfera de Gauss, la cuadrícula resulta demasiado burda para compararla con un objeto desconocido. Se consigue otra cuadrícula más fina si dividimos cada celda de las 12 en cinco triángulos; cada triángulo puede subdividirse, a su vez, en cuatro triángulos menores. La cuadrícula resultante posee 240 celdas y, por consiguiente, alrededor de 120 celdas cubren cualquier hemisferio de la esfera que deba ajustarse al histograma de orientación del objeto.

Existen muchos refinamientos técnicos para este proceso de ajuste que no analizaremos aquí. En general, se comparará el histograma de orientación del objeto observado con los histogramas de orientación de varios prototipos. Mediremos el éxito del ajuste calculando el cuadrado de las diferencias de masa para cada celda. El ajuste mejor será aquel para el que la suma de los cuadrados de todos los pares de celdas correspondientes resulte mínima. En la práctica, hemos visto que se necesitan unos 720 intentos para encontrar la disposición de la EGI de un objeto desconocido. La precisión está entre 5 y 10 grados de arco.



9. CENTRO DE MASA de la sustancia (*color*) que recubre el hemisferio de la imagen de Gauss generalizada: depende del área de la sección transversal del objeto al que se corresponde la EGI. Cuando se ve un huevo por su extremo puntiagudo (*a*), el centro de masa del hemisferio correspondiente de su EGI se halla cerca del plano que divide la esfera de Gauss por la mitad (*b*). Si se observa la parte achatada del huevo (*c*), el centro de masas del correspondiente hemisferio de su EGI cae más alejado del plano divisor (*d*). Puede demostrarse que la distancia entre el centro de masa y dicho plano es igual a la razón entre el área de la sección transversal y el área de la zona visible del objeto. Razón que es conocida y nos permite eliminar muchas orientaciones de la EGI del prototipo en la comparación con el objeto desconocido.

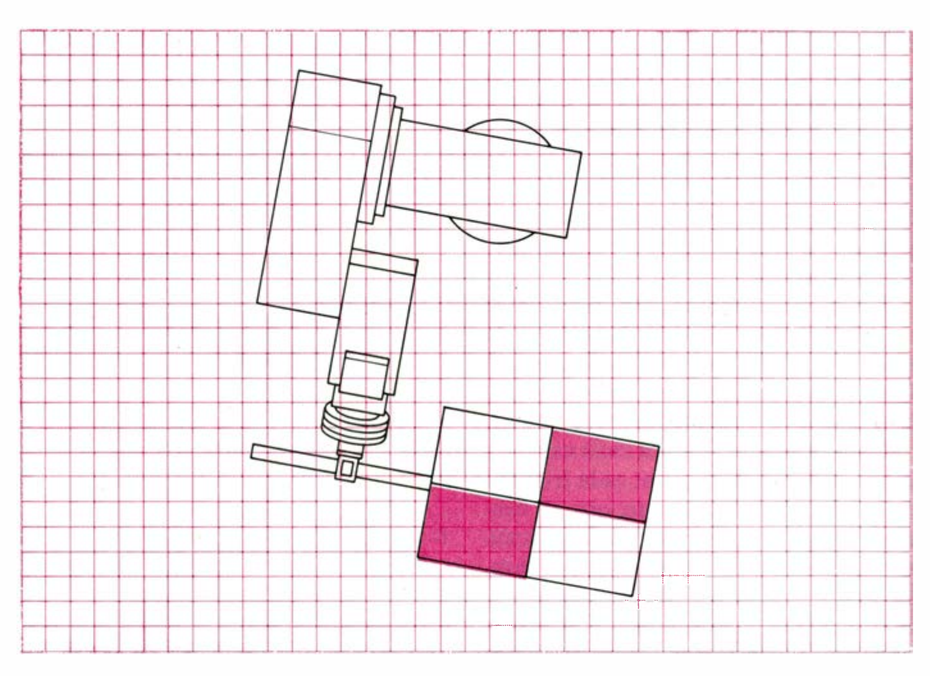
Una vez acotadas la identidad del objeto observado y la disposición de su EGI, procede determinar su disposición espacial; el control del brazo del robot resulta, entonces, casi inmediato. El ordenador debe definir qué puntos sobre la superficie del objeto son los más adecuados para asirlo. Aunque la decisión viene en parte dictada por la forma del objeto, conviene elegir puntos de sujeción que estén por la región superior del objeto, con el fin de no interferir con los objetos vecinos que están en el cesto.

Merece la pena resaltar que los cálculos que hemos descrito no dan la posición del objeto. Esta puede definirse, de manera un tanto burda, mediante el punto situado en la región central del objeto en el plano imagen de la cámara. La posición se puede encontrar de forma más precisa calculando el diagrama de agujas a partir de la orientación conocida del prototipo. El diagrama así obtenido puede, entonces, compararse con el diagrama de agujas observado.

La posición del objeto en la imagen de la cámara define una línea, o dirección, desde la cámara. Con el propósito de ordenar al brazo del robot que se mueva a lo largo de la línea, es necesario transformar las coordenadas espaciales medidas con respecto a la cámara en las coordenadas espaciales medidas con referencia al brazo. Se establece una regla general para la transformación mediante el calibrado de unos cuantos puntos fijos. Las tenazas del robot mueven una marca de prueba hacia varios puntos fijos situados en dos planos paralelos al plano imagen de la cámara. Para cada punto, las coordenadas del brazo, obtenidas por los sensores del robot, se ajustan a las coordenadas espaciales medidas por la cámara. Efectuada la calibración, cada punto de la imagen puede asociarse con un punto de cada uno de los dos planos. Los dos puntos definen una línea en las coordenadas espaciales del brazo.

El brazo del robot comienza a moverse a lo largo del rayo desde una altura conveniente por encima de los objetos del cesto contenedor. Puesto que la estereofotometría no suministra información sobre la distancia absoluta al objeto a lo largo del rayo, instalamos un sensor en las tenazas del robot. El sensor se activa mediante un haz modulado de rayos infrarrojos que se propaga de un lado a otro de las tenazas. Cuando la propagación del haz se interrumpe, se detiene el brazo. La mano se reorienta entonces, si es necesario, para ajustarse a la disposición del objeto, se cierran las tenazas y levanta el objeto con toda limpieza.

Nuestro sistema tarda aproximadamente un minuto en encender y apagar las luces, registrar las imágenes, ajustar los datos observados con los prototipos y enviar las órdenes adecuadas al manipulador. No existe ninguna razón intrínseca por la que el tiempo de ciclo no pueda acortarse. Los cálculos son sencillos; además, se puede construir un soporte físico (hardware) específico para aumentar la velocidad del ajuste. Nosotros pretendíamos sólo demostrar la viabilidad de nuestro método a la hora de resolver el problema, no revelar con qué rapidez podía funcionar. La mayoría de las veces el robot tomaba un objeto de la pila al primer intento.



10. COORDINACION ENTRE OJO Y MANO de un robot. Se lleva a cabo calibrando el sistema de coordenadas espaciales del brazo del robot con el sistema de coordenadas espaciales de la cámara electrónica. Se traslada una marca de prueba hacia una serie de puntos fijos en el sistema de coordenadas del brazo, y a las imágenes de los puntos se les asigna un segundo conjunto de coordenadas que tienen por referencia la cámara. El robot y la marca de prueba se muestran en la figura tal como se ven por la cámara, a través de una malla de ejes coordenados. El ordenador calcula la transformación por la que las coordenadas de un punto en un sistema se obtienen a partir de las coordenadas del punto en el otro.

De forma ocasional, los dedos de las tenazas golpeaban otro objeto antes de alcanzar el propuesto; el brazo se apartaba entonces del campo de visión y el proceso comenzaba de nuevo desde el principio.

Nuestro sistema es susceptible de modificación desde distintas ópticas. Ni dudamos de que habrá que introducir mejoras antes de que lo adopte la industria. Le acabamos de añadir un sistema diseñado por H. Keith Nishihara, del MIT, que simula visión estereoscópica para determinar la topografía de una superficie. Este sistema aventaja la estereofotometría usada como único método en que suministra información sobre la profundidad absoluta. En otro experimento, sustituimos las luces y la cámara empleadas en estereofotometría por sensores láser. Ambos métodos permiten que el robot evite moverse a lo largo del rayo que intersecta objetos por delante del objetivo.

Para muchas aplicaciones industriales, el robot resulta demasiado lento y no se precisa su versatilidad. En tales casos la norma es la automatización más simple e inmediata: diseñar maquinaria de propósito específico para orientar las piezas. Por ejemplo, piezas pequeñas como tornillos y otros objetos dotados de geometría cilíndrica pueden verterse en recipientes vibratorios que rechacen todas las configuraciones de los objetos salvo la configuración requerida. Pero ni las piezas grandes o pesadas, ni las que poseen una forma complicada son adecuadas para la selección por vibración. Es más, sería necesario un enorme volumen de producción para justificar el costo de tal maquinaria.

Creemos que el sistema que hemos descrito, por su flexibilidad y robustez, puede ser adaptado a trabajos industriales. Reconoce los objetos con fiabilidad y determina su disposición espacial. Las cámaras y demás mecanismos necesarios son relativamente baratos, puesto que sólo se barren unos pocos miles de pixeles para cada campo de visión. El programa del ordenador se dedica a efectuar la correspondencia de estructuras. Y las estructuras de los prototipos se obtienen directamente de datos ya presentes en programas de diseño por ordenador (CAD). La estereofotometría es de aplicación inmediata en la industria, pues no requiere condiciones especiales de iluminación; fuentes accesorias de luz se instalan casi en cualquier posición, teniendo en cuenta que la calibración del nivel de grises debe hacerse una vez fijadas todas las luces. Más aún, el método no se limita a materiales con propiedades particulares de reflexión de luz. Todavía queda por ver qué mejoras adicionales se harán antes que las máquinas de visión se apliquen, de una forma generalizada, a la mecanización del trabajo.

Reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas

Esas aves comparten pareja y crían en grupo a sus pollos. El estudio del insólito sistema social del picamaderos de las bellotas muestra de qué modo la selección produce, simultáneamente, cooperación y competencia

Peter B. Stacey y Walter D. Koenig

En las regiones templadas de septentrión la inmensa mayoría de las especies de aves se reproducen en parejas monógamas. Las dos aves, ya sea por separado o juntas, eligen el sitio para anidar, construyen el nido, colectan alimento, incuban los huevos, alimentan a los pollos y los protegen. Así, en la mayoría de especies, cada pareja monógama constituye una unidad social más o menos autosuficiente. Una notable excepción a esta regla es la del picamaderos de las bellotas, también llamado pájaro carpintero bellotero y carpintero hormiguero (*Melanerpes formicivorus*); se trata de un residente común y conspicuo de los robledales y los bosques de pinos y robles de los Estados Unidos sudoccidentales, México y América Central. La unidad social del picamaderos de las bellotas es un grupo territorial que puede incluir más de una docena de miembros. En invierno, la principal fuente de alimento del grupo es la bellotera, es decir, bellotas y otras nueces, que guardan en agujeros perforados en un árbol transformado en almacén. Este árbol, al que se denomina granero, se considera de propiedad común: la perforación de nuevos agujeros, el almacenamiento de bellotera y la defensa del árbol ante el acoso de intrusos son funciones realizadas por todos los miembros del grupo.

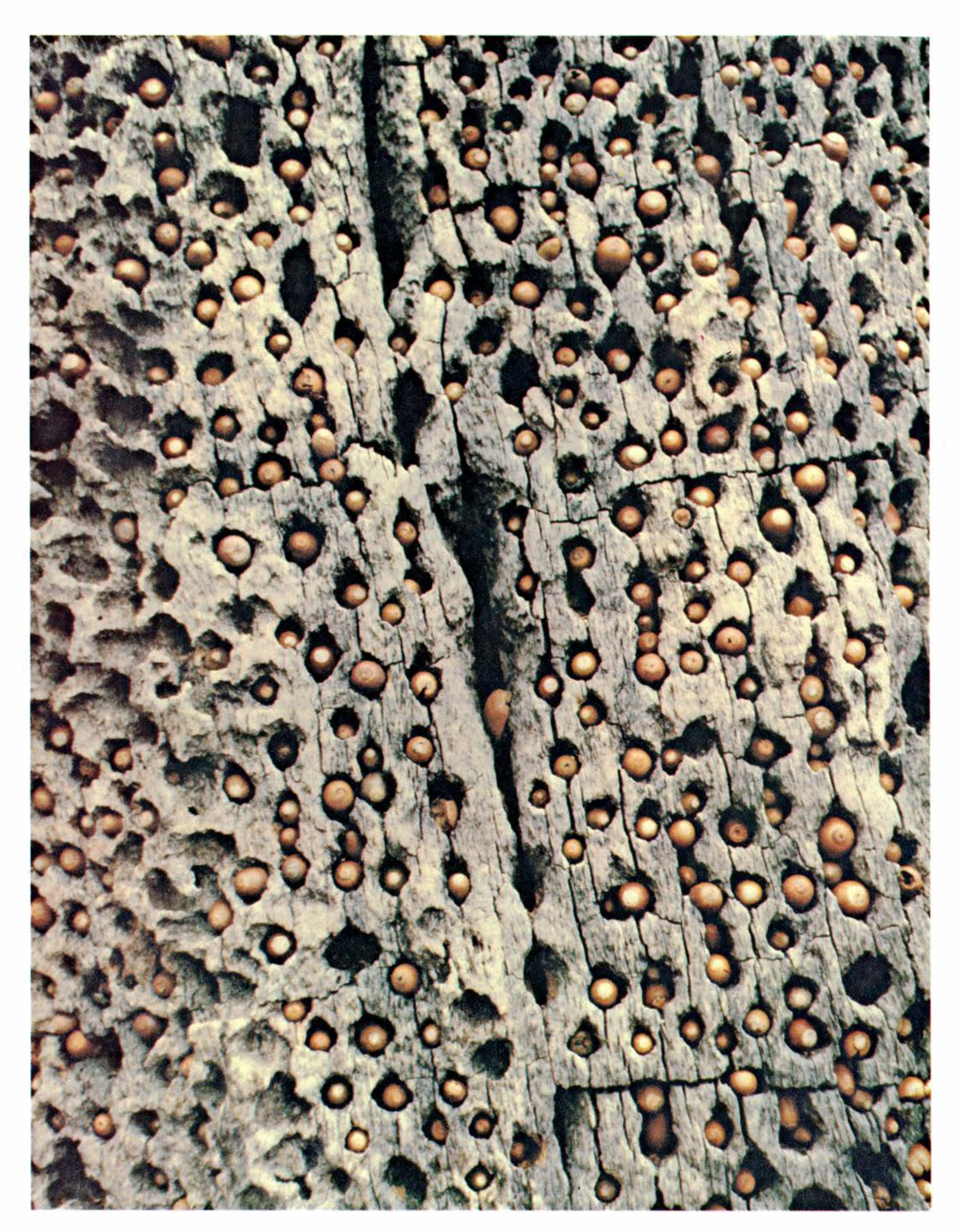
En el grupo del picamaderos de las bellotas, apareamiento y cría de los pollos son, también, tareas colectivas. Las aves sexualmente adultas de cada grupo están divididas en reproductoras y "asistentes" no reproductoras. En los adultos reproductores se comparte la pareja. Así, en una colonia con tres reproductores de cada sexo, los tres machos pueden reproducirse, según se ve, con cualquier hembra. De este modo, las crías de picamaderos de las bellotas son realmente progenie del grupo; los miembros adultos contribuyen, todos, a la cría de los polluelos. El grado en que la pareja es compartida, y la relación entre asistentes y reproductores, dependen, en parte, del clima de la región y, en parte, de los recursos alimentarios disponibles. En consecuencia, la estructura del grupo varía bastante de una a otra región.

El modo de reproducción del picamaderos de las bellotas, considerada en toda su extensión, plantea cuestiones difíciles para el estudioso de la evolución biológica. Empecemos por preguntas fundamentales: ¿Por qué los asistentes permanecen en el grupo durante la estación reproductora y no se marchan a otra parte para procrear por su cuenta? ¿Por qué los adultos reproductores colaboran en la cría de volantones que quizá no sean sus propios descendientes? La mayoría de los biólogos están de acuerdo en que en general la presión selectiva actúa en el plano del individuo o en el de los genes; no en el plano del grupo social o de la especie. La evolución estimula aquellas estrategias reproductivas que le permiten a un organismo transmitir copias de sus genes a la siguiente generación. Un ave que desempeñe la función de asistente no reproductor o que críe a pollos que no son hijos suyos parece proceder contra la presión evolutiva. ¿Por qué razón, entonces, perdura este comportamiento en el picamaderos de las bellotas? La respuesta puede esclarecer el modo en que las presiones selectivas subyacentes se manifiestan en sistemas sociales que se nos ofrecen paradójicos.

A lo largo de la última década los autores y sus colegas han estudiado la reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas en tres hábitats distintos de los Estados Unidos. Uno de los autores (Stacey) trabajó principalmente en Water Canyon, en las Montañas de la Magdalena de Nuevo México central, y también en el Rancho de Investigación Appleton-Battell, de Arizona sudoriental. El otro (Koenig) lo hizo en la Reserva de Historia Natural de Hastings, en la California central costera. En la mayoría de regiones donde los picamaderos de las bellotas han sido objeto de estudio, viven en grupos sociales permanentes formados por hasta 15 miembros. Cada grupo ocupa un territorio que es defendido vigorosamente de todos los demás picamaderos de las bellotas. Suele haber un nido activo por grupo en cada momento dado.

La característica del comportamiento del picamaderos de las bellotas que atrajo la atención de los ornitólogos no era su vida en grupo, sino su costumbre de almacenar grandes cantidades de bellotas, piñones y otras nueces en un árbol-granero. En otoño, los miembros del grupo recolectan la bellotera y la calzan en agujeros perforados en la corteza de un árbol vivo o en la madera de uno muerto. Hay árboles-granero con más de 30.000 agujeros. Almacenes de tal capacidad permiten que el grupo proteja grandes cantidades de alimento de los efectos del tiempo y de la rapiña de otros animales.

Cuando los ornitólogos descubrieron cómo el pájaro carpintero bellotero almacenaba las bellotas, hubo quien sugirió que las aves pudieran estar empleando los glandes para cultivar insectos. Se suponía que conforme aquéllos se descomponían durante el invierno eran invadidos por larvas de insectos, y los picamaderos dispondrían de éstas como un fácil recurso alimentario. Sin embargo, observaciones de campo más detalladas mostraron que las aves cambian regularmente las bellotas de un



1. ARBOL-GRANERO utilizado por el grupo de picamaderos de las bellotas para almacenar la bellotera: bellotas y otras nueces de cáscara dura. El árbol de la fotografía, que fue tomada por uno de los autores (Koenig) en la Reserva de Historia Natural de Hastings, en la costa de California central, es un roble. Los agujeros los perforan generaciones sucesivas de miembros de un solo grupo de picamaderos de las bellotas; en algunos árboles-granero se han abierto hasta 30.000 agujeros. Las nueces se depositan en los agujeros en otoño, estación en la que el grupo intenta acumular suficientes reservas de alimento para que duren todo el invierno. El árbol-granero es una característica básica de la ecología y de la estructura social del grupo de picamaderos.



2. LOS PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS son residentes muy vistosos de los bosques de robles y de pino y roble de los Estados Unidos sudoccidentales, México y América Central. Miden unos 23 centímetros de longitud. Las únicas diferencias visibles entre el macho y la hembra es que ésta posee una banda negra que separa las regiones roja y blanca de la cabeza; aquí hay una hembra con dos machos. Viven en grupos sociales compuestos de hasta 15 miembros, entre los que hay varios reproductores de cada sexo y asistentes no reproductores que son progenie de años anteriores. El dibujo es obra de Patricia J. Wynne.

agujero a otro para evitar que se pudran o caigan del árbol cuando las nueces se secan y encogen. Los picamaderos se alimentan de las bellotas y rechazan las que han sido invadidas por insectos.

Cualquier miembro del grupo puede comer en cualquier momento de la bellotera. A lo largo del invierno la bellotera almacenada es un recurso muy importante para la supervivencia de la colonia. En primavera y verano los picamaderos comen insectos, savia de los árboles, amentos y néctar floral. Sin embargo, en la mayoría de hábitats templados tales alimentos escasean o faltan por completo en invierno. El grupo de carpinteros hormigueros que agote su bellotera almacenada en los meses de invierno suele verse obligado a abandonar su territorio.

El naturalista encuentra, por lo general, fácil acceso a los árboles-granero; si se arma de paciencia, hasta podrá contar las bellotas o nueces almacenadas. Vale decir que puede estimarse el valor energético de los graneros y la población total de picamaderos de la zona. Los cálculos demuestran que la bellotera almacenada resulta decisiva, además de para la supervivencia, para la reproducción. En este sentido, a lo largo de un período de 10 años en la reserva californiana de Hastings, de los grupos que poseían bellotera almacenada en primavera, el 83 por ciento criaron con éxito a sus pollos hasta el estadio de volantones, es decir, cuando abandonan el nido. De los grupos que habían agotado su despensa, sólo el 20 por ciento criaron con éxito sus pollos hasta el estadio de volantones. En los años de buena cosecha bellotera los grupos se reproducen a veces en otoño además de hacerlo en primavera, fenómeno raro en climas templados.

El efecto del almacenamiento de la bellotera se observó asimismo en Water Canyon, Nuevo México. A lo largo de un período de nueve años, los grupos que tenían bellotera en invierno produjeron una media de 2,7 volantones por año; los grupos que se quedaron sin ella, una media de 1,3 volantones. Lo sorprendente de tales resultados reside en un detalle importante: los pollos no comen bellotera. Esta sirve de reserva alimenticia que permite a los adultos ir a la busca de insectos, que luego son ofrecidos como alimento a los pollos.

Anotando a intervalos regulares la cantidad de bellotera almacenada por distintos grupos y correlacionando después los resultados con observaciones de los grupos, se demostró que el almacenamiento de bellotera ejercía una gran influencia sobre la estructura de la población de picamaderos de las bellotas en una zona determinada. En los años de elevada cantidad de reservas almacenadas, la proporción de adultos que sobrevivían al invierno era también alta. En consecuencia, la población total de picamaderos de la zona era grande y había más grupos que podían permanecer en sus territorios hasta la primavera. Puesto que la mayoría de territorios se hallaban ocupados de manera continua, eran pocos los pollos que podían abandonar el lugar para colonizar otro por su cuenta. Por tanto, una fracción bastante considerable de cada grupo estaba constituida por asistentes no reproductores.

La cantidad de bellotera que un grupo de picamaderos puede almacenar viene determinada, en parte, por la producción de bellotas o nueces de los árboles de su territorio. Depende también del número de agujeros de almacenamiento que el grupo ha perforado en el árbol-granero. Y habida cuenta de la presión intensa que la cantidad de bellotera almacenada ejerce sobre la estructura y continuidad del grupo, parecería lógico que los miembros de éste dedicaran gran parte de su tiempo a la perforación de nuevos agujeros de almacenamiento.

Uno de los autores (Stacey) ha descubierto, sin embargo, que las aves sólo excavan agujeros de almacenamiento cuando tienen bellotera. Si las reservas se han agotado, no pican más. La razón es la siguiente: en ausencia de bellotera acumulada, los miembros del grupo pasan mucho tiempo buscando otro alimento. Si se dispone de un almacén de bellotera, se dedica menos tiempo a la búsqueda de alimento. Además, algunos miembros del grupo deben permanecer cerca del granero para guardar las provisiones, y son estos vigilantes los que perforan los nuevos agujeros; si no hay provisiones que guardar, los guardianes se incorporan a la búsqueda de comida.

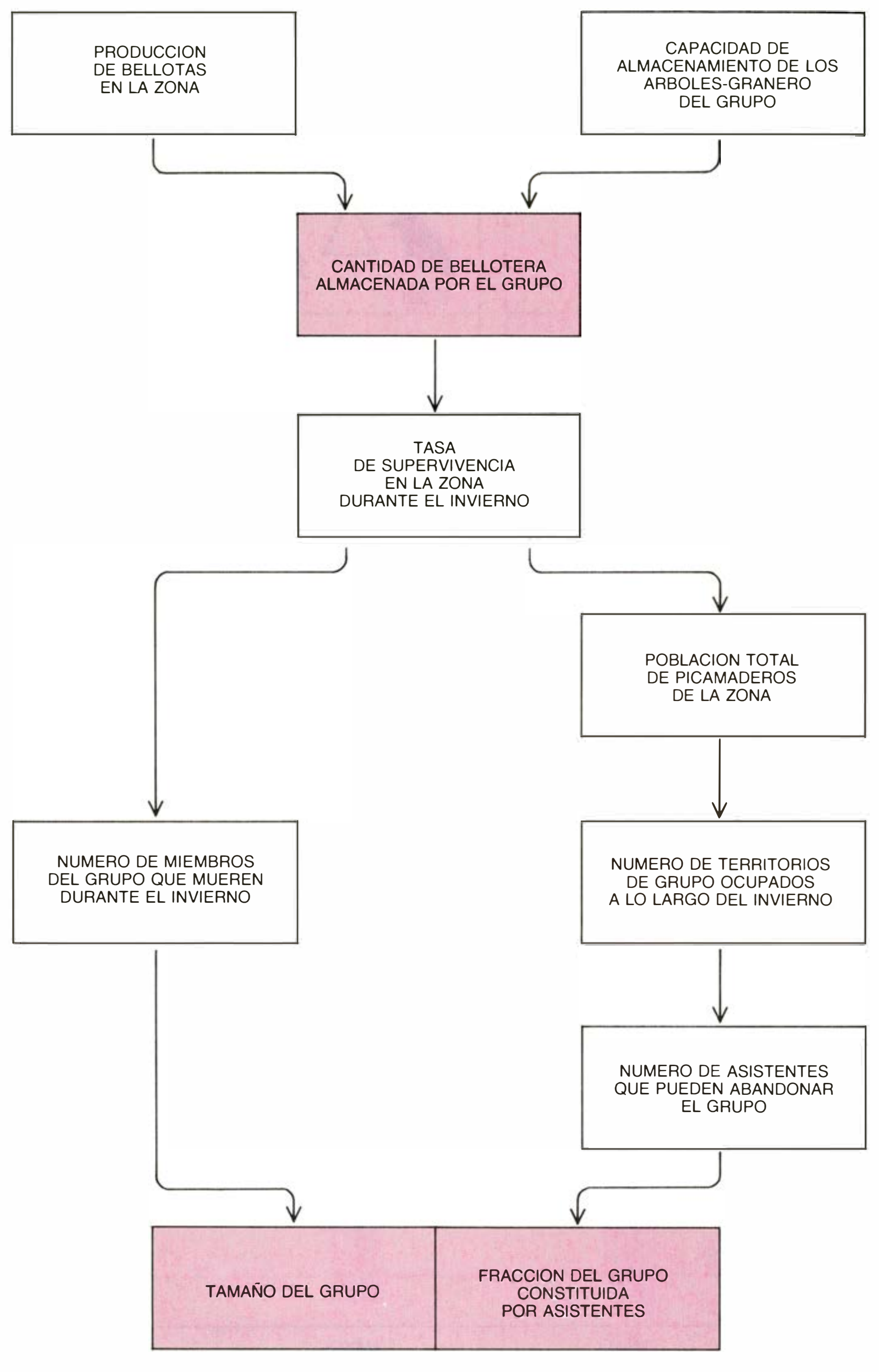
La construcción de almacenes por parte del grupo de picamaderos de las

bellotas constituye un ejemplo de sistema biológico con retroalimentación positiva. Los grupos con muchos agujeros de almacenamiento acumulan bellotera suficiente para perforar nuevos agujeros a lo largo del invierno. La mayor capacidad posibilita que el grupo almacene más nueces el otoño siguiente. Durante un largo período, el número de agujeros puede estar limitado por un solo factor: los graneros no son eternos.

Suelen construirse en árboles que están total o parcialmente muertos. Incluso los más robustos, que son los robles, duran escasos decenios desde el momento en que el grupo de carpinteros empieza a utilizarlos. El árbol-granero termina por pudrirse y caer. La pérdida del árbol induce una reducción en el tamaño del grupo, en su éxito reproductor y en la probabilidad de que permanezca como residente en su territorio durante todo el año. En algunos casos, la caída de un árbol-granero grande determina la propia disolución del grupo.

En los últimos años la investigación ha puesto de relieve la amplia diversidad que existe en la organización reproductora de las especies de aves que crían cooperativamente. En algunas especies, así la abubilla arbórea verde de Africa y el arrendajo de matorral de Florida, las aves forman grupos integrados por una pareja reproductora única y por asistentes no reproductores; los asistentes suelen ser progenie de años anteriores. Otras especies, entre ellas la gallina nativa de Tasmania y el halcón de las Galápagos, presentan poligamia cooperativa, es decir, comparten las parejas. Compartir la pareja supone la ocurrencia de varios machos o hembras reproductores; en las especies de Tasmania y de las Galápagos los reproductores múltiples son siempre machos. Se acepta que en estas especies la pollada puede recibir genes de todos los machos reproductores. Dentro mismo del conjunto de estas especies insólitas destaca el picamaderos de las bellotas: sus grupos presentan, a la vez, asistentes no reproductores y compartición de pareja. Fenómeno este último que afecta, simultáneamente, a machos y hembras.

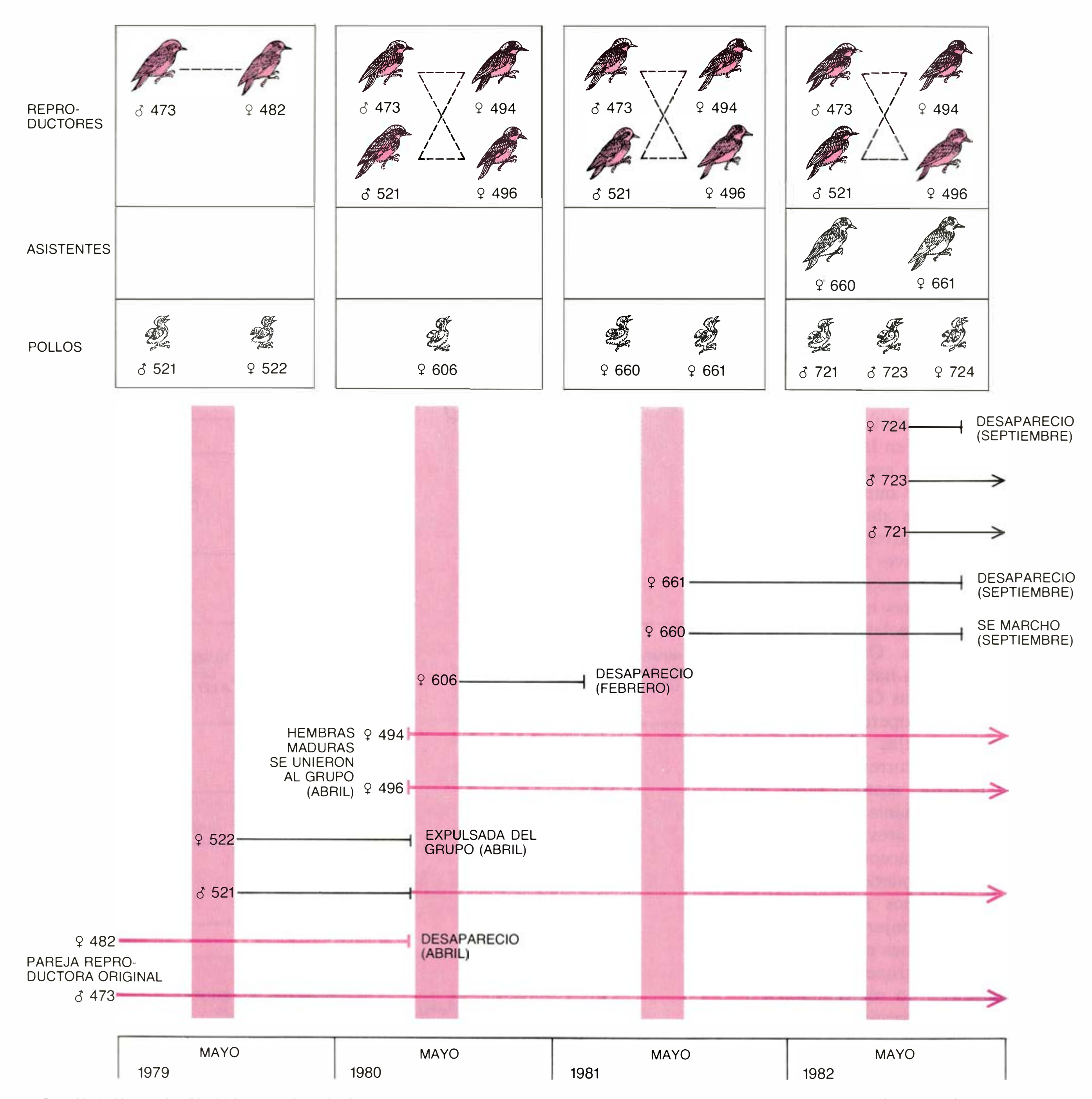
En el picamaderos de las bellotas no hay comportamiento de cortejo entre parejas heterosexuales. Además, el grupo entero atiende a un solo nido. Determinar, pues, los papeles reproductores en un grupo cooperativo no es tarea fácil. La cópula se observa raramente, lo que dificulta no poco saber la categoría reproductora de los machos. Desde hacía mucho tiempo se sospechaba que en el grupo intervenía más de un macho en la misión reproductiva, pero faltaban pruebas de ello, que acaban de llegar con el análisis genético de las enzimas de la sangre de los miembros de varios grupos de picamaderos; este estudio se hizo en colaboración con Nancy E. Joste y J. David Ligon, de la Universidad de Nuevo México, y Ronald L. Mumme y Robert M. Zink, de la Universidad de Berkeley.



3. ESTRUCTURA DEL GRUPO del picamaderos de las bellotas; viene condicionada por la cantidad de bellotera que almacena en otoño. Esa cantidad está determinada, a su vez, por la cosecha del territorio y por la capacidad de almacenamiento de los graneros que el grupo posee. La cantidad de bellotera afecta al número de aves que sobrevivirán al invierno. La tasa de supervivencia influye sobre la población total de picamaderos de la zona y también sobre el número de territorios deseables que permanecen ocupados todo el año. Si la población de la especie es grande y hay muchos territorios ocupados, pocos jóvenes podrán abandonar sus grupos paternos para establecerse por su cuenta. En consecuencia, los grupos se agrandan y una fracción sustancial de cada uno corresponde a asistentes no reproductores. La cantidad de bellotera almacenada influye asimismo sobre el número de pollos que el grupo cría con éxito.

La categoría reproductiva de las hembras se establece sin tantas dificultades; podremos observar la oviposición si vigilamos atentamente el grupo durante la estación reproductora, que suele caer a finales de primavera y principios de verano. En Water Canyon, los grupos de carpinteros con más de una hembra reproductora son raros; no así en la reserva de Hastings, donde el 20 por ciento de los grupos comprenden dos o más hembras que ponen huevos en el mismo nido. En ambas zonas los grupos se completan con machos y hembras que no se reproducen.

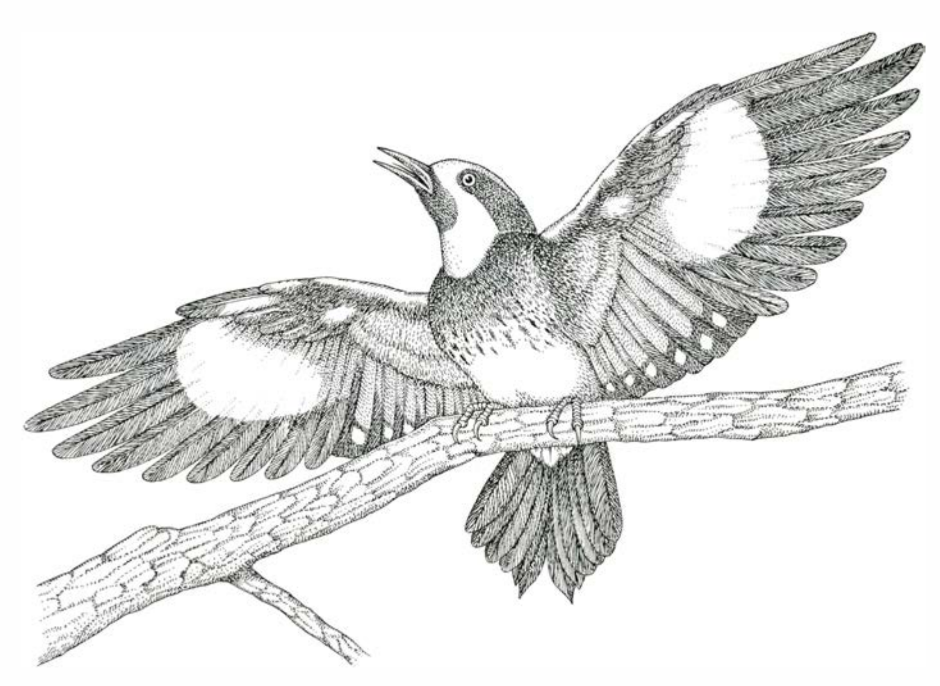
En una y otra población, una de las primeras líneas de investigación que se abordó fue la de desentrañar las relaciones de reproducción en el grupo y averiguar qué era lo que determinaba la categoría reproductora de cada una de las aves. Se llegó al descubrimiento de que existían intrigantes diferencias estructurales entre los grupos de una zona y los de la otra. En ambas regiones, los asistentes eran progenie del grupo nacida en años anteriores. Sin embargo, en la reserva de Hastings, los machos que compartían una pareja solían ser hermanos y, menos comúnmen-



4. SE ENTIENDE POR VACIO REPRODUCTOR la desaparición de todos los machos reproductores originales o de todas las hembras reproductoras originales. Se trata de un acontecimiento de gran significado para el grupo de picamaderos. La ilustración muestra la historia, de 1979 a 1982, del grupo "Plaque", en la reserva de Hastings. El color indica un adulto reproductor potencial. En los recuadros de arriba las líneas discontinuas señalan los miembros del grupo que pueden aparearse; puesto que raramente se observan cópulas, no es fácil establecer si todos los reproductores potenciales se aparean. En mayo de 1979 el grupo Plaque estaba constituido por el macho n.º 473 y la hembra n.º 482. Sus primeros descendientes, el macho n.º 521 y la hembra n.º 522, nacieron en 1979; mientras sus padres estuvieron en el grupo los hijos no pudieron reproducirse. Antes de la estación reproductora de 1980 la hembra reproductora original (n.º 482) desapareció. Dos hermanas de un grupo cercano (n.ºs 494 y 496) se unieron a la unidad Plaque después de una lucha y obligaron a la hembra n.º 522 a salir del grupo. Al marcharse su madre, el macho n.º 521 empezó a reproducirse con las hembras inmigrantes.

te, padre e hijo; las hembras que compartían parejas podían ser hermanas o madre e hija. En Water Canyon, las aves que compartían pareja podían o no hallarse emparentadas genéticamente.

Para comprender cómo pudieron surgir tales diferencias debe contarse la historia de un grupo típico. Este puede fundarlo una pareja macho-hembra o la unión de dos "coaliciones" de grupos diferentes. Una coalición consta de uno a cuatro machos, hermanos por lo común, extraídos de un grupo establecido. La otra está compuesta por una a tres hembras, que por lo general también son hermanas, salidas de otro grupo.



5. EXHIBICION WAKA: despliegue que hace un picamaderos de las bellotas a otros miembros de su grupo mientras vigila el granero; lo repetirá en la lucha, para obtener un lugar reproductor que haya quedado libre en un grupo. La elevación de las alas constituye una exhibición de "saludo" o de "reconocimiento" entre los miembros del grupo. En la lucha pueden intervenir hasta 50 aves, que se libran durante varios días a una persecución y exhibición mutuas y continuas. Los ganadores se quedan para reproducirse en el territorio vacío; los perdedores retornan al grupo de origen a desempeñar la función de asistente.

Una vez fusionadas las coaliciones todos los adultos maduros pueden reproducirse cual una sola unidad. Los jóvenes que abandonan luego el nido permanecen en el grupo al menos hasta la primavera, su primera, y a veces durante más tiempo. Con una excepción notable, que se comentará más adelante, los descendientes del grupo no se reproducen mientras permanecen en su grupo natal. El grupo varía de tamaño a medida que los jóvenes se convierten en volantones y que éstos y otras aves lo abandonan. La unidad mantiene su continuidad mientras uno, al menos, de los reproductores originales de cada sexo se halle presente. Sin embargo, como sea que los reproductores originales mueren o se van, llega un momento en que todos los fundadores de uno u otro sexo han desaparecido.

La desaparición de todos los machos reproductores originales o de todas las hembras reproductoras originales crea lo que se conoce por un vacío reproductor, que es de importancia fundamental en la historia del grupo. El vacío reproductor no lo llenan los asistentes del grupo; la hija no sustituye a la madre en su función reproductora, ni el hijo sustituye al padre. Antes bien, la vacante es ocupada por aves maduras externas al grupo.

Contrariamente a lo que se creía hace sólo unos años, los jóvenes picamaderos de las bellotas no permanecen en su territorio natal a la espera de heredarlo de sus progenitores del mismo sexo. Pero una vez cubierto el vacío reproductor, los descendientes del grupo del sexo opuesto al del nuevo reproductor sí pueden ya aparearse. Si una hembra reproductora de un grupo, por ejemplo, ha sido sustituida, los hijos del grupo que son machos pueden reproducirse a pesar de la presencia de los machos reproductores originales; y para las hembras ocurre exactamente al revés.

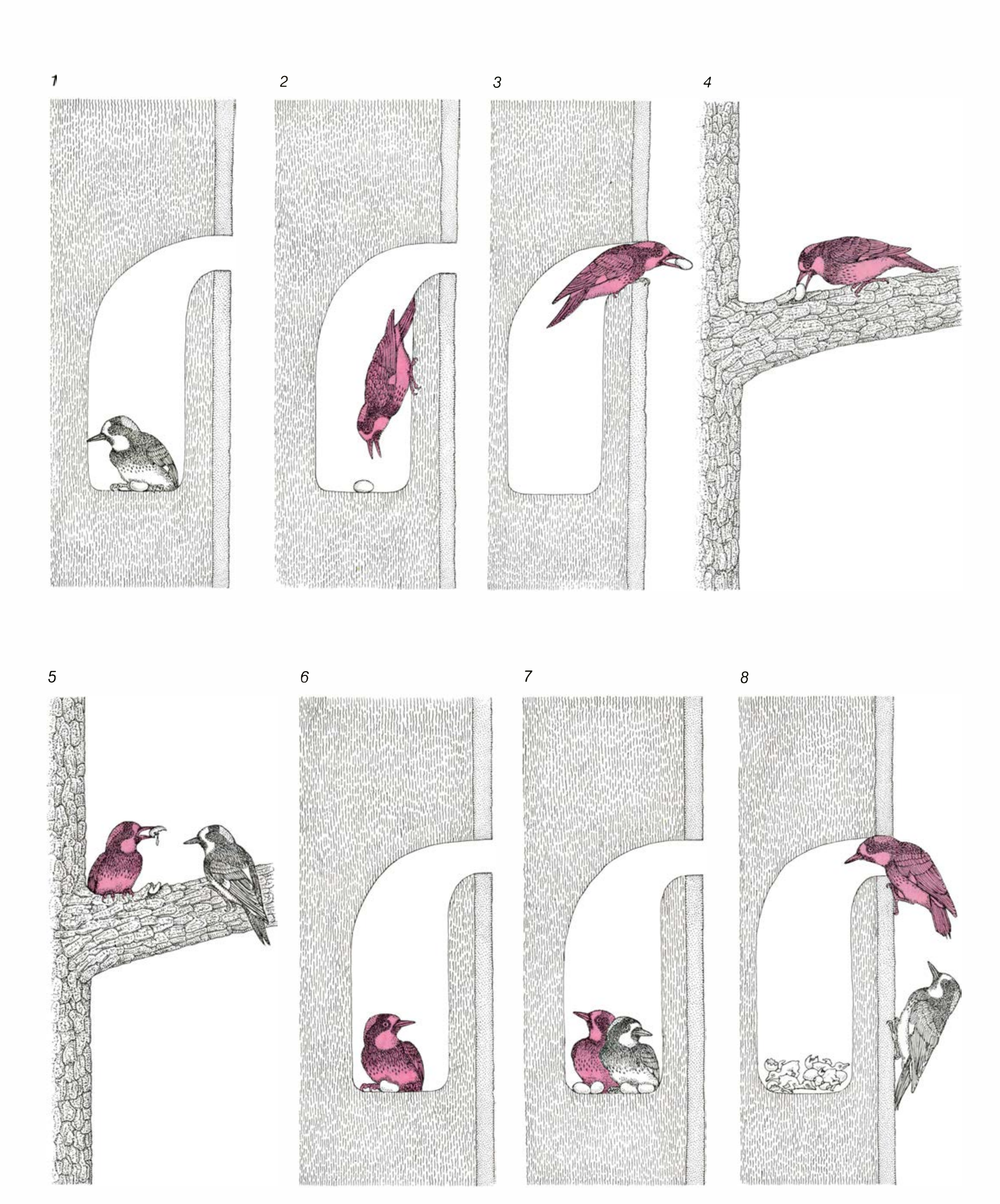
Explicar las características de la reproducción en los picamaderos de las bellotas cuesta más que describir cómo se forma el grupo. El hecho de compartir la pareja justifica por qué un grupo de aves coopera en la alimentación de los pollos. En efecto: en algunos grupos, todos los adultos que cooperan son, real o potencialmente, padres de los pollos. La hipótesis no explica, sin embargo, el papel de los asistentes ni la buena disposición de los reproductores a compartir pareja.

De hecho, podría suponerse que el compartir pareja va en contra del interés engendrador del adulto reproductor. El número de pollos de los que el grupo puede cuidar es limitado. De ahí que cuando el reproductor comparte una pareja exista una reducción en la fracción de pollos del grupo que son descendientes de este reproductor. La mayoría de especies de aves que cooperan en la cría de la descendencia no comparten la pareja; el macho y la hembra dominantes excluyen a todos los demás adultos de la reproducción y sólo se aparea una pareja.

Sin embargo, investigaciones recientes de uno de los autores (Stacey) sugieren que, en determinadas circunstancias, compartir la pareja resulta ventajoso para el individuo reproductor. En ciertos ambientes la cooperación representa una contribución importante al éxito reproductor del individuo e incluso a su supervivencia a largo plazo. La reducción del tamaño del grupo colocaría al individuo en una situación desventajosa. Si las aves subordinadas que se excluyen de la reproducción tuvieran probabilidades de abandonar el grupo, las dominantes potenciarían su propio éxito reproductor al compartir la cría.

Los datos obtenidos en Water Canyon y en la reserva de Hastings apoyan la hipótesis según la cual estos factores actúan realmente en los grupos de picamaderos de las bellotas. En Water Canyon el número de juveniles volantones por macho reproductor es superior en grupos compuestos por dos machos y una hembra que en grupos constituidos por una pareja reproductora. En los grupos de tres había por término medio 1,16 juveniles por macho adulto; en las parejas, 0,92 juveniles por macho. Así, cuando un macho comparte la paternidad con otro macho en un trío, consigue sacar adelante más de sus propias crías que si expulsara al segundo macho y las sostuviera por sí solo.

En la reserva de Hastings el éxito reproductor del individuo disminuye a medida que el grupo se expande, pero la fracción de aves que sobrevive por



6. DESTRUCCION DE LOS HUEVOS: es una forma de competencia genética entre las hembras del grupo de picamaderos de las bellotas. Las dos hembras que se ilustran aquí son hermanas. Cada ave pone un huevo diario durante tres o cinco días. Los períodos de puesta se solapan, sin ajustarse a una exacta sincronía. Poco después de que una hembra (*blanco y negro*) pone su primer huevo (*1*), su hermana (*color*) saca el huevo de la cavidad en la que éste se dejó (*2, 3*). La hermana lo coloca en una depresión de una rama cercana (*4*). Se le unen otros miembros del grupo, con frecuencia también la hembra que puso el huevo; juntos picotean el huevo hasta abrirlo y se comen su contenido (*5*). La destrucción de los huevos se repite hasta que la segunda hembra pone su primer huevo en la misma cavidad (*6*). Cuando esto ocurre, esta hembra deja de estropear los huevos de su hermana y, después de que ambas hembras han puesto huevos durante varios días sucesivos (*7*), los huevos son incubados por el grupo hasta que hacen eclosión (*8*). El significado evolutivo de tal conducta es claro: la hembra responsable del estropicio de los huevos acaba con más huevos en su puesta que su hermana. Sin embargo, la responsable de que los huevos se malogren en un año puede ser, al año siguiente, quien vea sus huevos estropeados por las demás. De ahí que, a lo largo de la historia del grupo, las dos hermanas puedan transmitir un número aproximadamente igual de copias de sus genes a las generaciones sucesivas.

año aumenta. El macho o la hembra que es el único reproductor de su sexo en un grupo tiene una tasa de supervivencia anual del 70 por ciento. En las hembras que comparten a su pareja la tasa de supervivencia es del 79 por ciento, y en los machos que comparten pareja la tasa es del 86 por ciento. Aunque en Water Canyon las tasas eran menores, regía una pauta similar: la supervivencia era del 47 por ciento para las aves que criaban en parejas, y del 65 por ciento para las que lo hacían en grupos mayores. Cuando se combinan los datos relativos al éxito reproductor y a la supervivencia, se torna evidente que, tanto en las poblaciones de Water Canyon como en las de la reserva de Hastings, un ave que empieza su carrera reproductora compartiendo un grupo con otros individuos del mismo sexo tiene una ventaja sobre la que cría en una pareja.

Aunque a primera vista el compartir la pareja y la reproducción cooperativa parecen contradecir el principio de que la selección natural opera sobre el individuo, un examen más detallado demuestra que la actividad cooperativa beneficia al individuo reproductor. Sin embargo, no todas las actividades en el grupo de picamaderos de las bellotas son armoniosas. La presión selectiva ha favorecido asimismo la competencia intensa. Hay dos formas notables de competencia reproductora: la destrucción de los huevos y la muerte de los pollos.

El descubrimiento, en la reserva de Hastings, de la destrucción de los huevos en los picamaderos de las bellotas débese a uno de los autores (Stacey) y Mumme. Como se ha mencionado, muchas de las hembras reproductoras de un grupo guardan entre sí un estrecho parentesco genético. Un episodio típico de destrucción de huevos puede ser protagonizado por dos hermanas. En la estación reproductora las hermanas ponen sus huevos en períodos que prácticamente se superponen, aunque no sincronizados del todo. Cada hembra pone de tres a cinco huevos a un ritmo de un huevo diario; los dejan en la misma cavidad que actúa como nido. Las hermanas comparten la incubación y la alimentación de los pollos.

El primer huevo a poner desencadena una pugna entre las hembras. Cuando una de las hembras pone su primer huevo, éste es casi invariablemente sacado del nido por la hermana, que lleva el huevo a un árbol cercano y lo pone en una depresión en la corteza de una rama. Luego el huevo es picoteado, roto y su contenido comido por varios miembros del grupo, entre los que suele hallarse la propia hembra que lo puso.

Cuando la hembra que puso el primer huevo deja otro al día siguiente, se repite el rito destructor. Se han hecho observaciones de la destrucción consecutiva de hasta cinco huevos del mismo nido. Proceso que sólo se detiene cuando la segunda hembra comienza a poner. En este punto, diríase, el ave se ve incapaz de diferenciar sus huevos de los de su hermana; y así evita su ulterior destrucción.

El valor adaptativo de la destrucción de los huevos es evidente. La hembra que acaba con la puesta de su hermana obtiene una ventaja genética en la puesta de huevos que es incubada por el grupo. De no mediar esa destrucción, cada hermana habría contribuido con un número igual de genes a la siguiente generación. Destruidos los huevos, el ave que los estropeó aporta una mayoría de genes a la descedencia. Pero dos hermanas pueden convivir en un mismo grupo varios años, y la hembra cuyos huevos han sido estropeados un año puede destruir los huevos de su hermana al año siguiente. El éxito reproductor de las hermanas a lo largo de su vida puede ser aproximadamente el mismo.

Una forma aún más extrema de competencia reproductora es la matanza de pollos por parte de inmigrantes advenidos al grupo. Entre los animales que viven en grupo la muerte de jóvenes por parte de recién llegados se conocía sólo en primates y en mamíferos carnívoros como los leones. Se observó por primera vez en la población de picamaderos de las bellotas de Nuevo México en 1981.

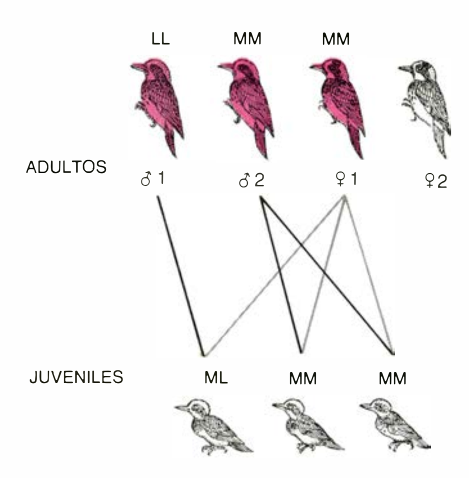
La matanza de pollos suele desarrollarse en la primavera o a principios de verano, cuando un picamaderos se une a un grupo con nido activo. Una condición previa para la matanza parece ser que el inmigrante sea la única ave madura de su sexo en el grupo, ya porque los anteriores reproductores de su sexo se hayan marchado, ya porque el inmigrante los haya echado. Una vez aceptado por los miembros del grupo del sexo opuesto, el nuevo se dispone inmediatamente a visitar el nido y acaba destruyendo los huevos o matando a los polluelos. El cuerpo de estos infortunados se saca del nido y puede ser comido por todos los miembros del grupo.

Discuten los biólogos evolutivos si la matanza de juveniles en un grupo cooperativo resulta siempre una estrategia adaptativamente ventajosa. Sin embargo, en el grupo de picamaderos de las bellotas el inmigrante proporciona un beneficio evidente. Puesto que sólo hay un nido, un ave que se añade al grupo después de que los huevos han sido puestos no puede aportar sus genes. Si al grupo le queda tiempo suficiente para volver a criar, el advenedizo que mata a los polluelos fuerza al grupo a reproducirse y con ello asegura la transmisión de sus genes.

Los grupos de picamaderos de las bellotas son unidades complejas en las que los miembros cooperan y compiten para maximizar su contribución genética a la siguiente generación. No se sabe, con precisión, por qué evolucionó la intrincada estructura de grupo. No obstante, se conocen bastante bien algunos de los factores ambientales que influyen sobre el grupo, incluidos los que determinan la categoría de los asistentes no reproductores.

La mayoría de descendientes permanecen en el grupo natal como asistentes porque se ven ecológicamente impedidos de abandonarlo; si surge la oportunidad de marcharse, los jóvenes suelen dispersarse para formar un nuevo grupo. La fuerza que impide la dispersión de los asistentes parece ser la saturación del hábitat, que simplemente significa que no hay territorios vacíos adecuados por cubrir y donde instalarse. La saturación del hábitat no supone que cada centímetro cuadrado de superficie esté ocupado por un grupo establecido de picamaderos de las bellotas; significa que, en una región determinada, los hábitats óptimos están siempre ocupados. Además, en la mayoría de regiones donde viven los picamaderos de las bellotas escasean los hábitats marginales susceptibles de albergar un nuevo grupo constituido por aves que hasta entonces no habían sido reproductoras. Puesto que los descendientes del grupo no pueden procrear independientemente, tienen la posibilidad de beneficiarse de la permanencia en el territorio de sus progenitores y de ayudar a criar a los hijos de sus parientes genéticos.

Varios tipos de pruebas confirman la conclusión de que la saturación del hábitat desempeña un importante papel a la hora de mantener a los jóvenes picamaderos de las bellotas en su grupo natal. Un tipo de prueba sorprendente lo constituye la espectacular lucha que se libra por los vacíos reproductores. Con frecuencia, dotaciones de hermanos procedentes de grupos separados entre sí varios kilómetros con-



7. PRIMERA PRUEBA de paternidad múltiple en un sistema reproductor comunitario aviar; la obtuvieron los autores y sus colaboradores para el picamaderos de las bellotas. Se ilustran las relaciones de paternidad en un grupo de Water Canyon, Nuevo México. Las letras *L* y *M* significan banda lenta y banda media, respectivamente. Cada letra designa un alelo, variante de un gen, para una enzima sanguínea. Cada par de alelos que el ave porta se identificó mediante la técnica denominada electroforesis sobre gel, en la que las enzimas pueden separarse según su movilidad en un gel. La hembra número 2 era asistente, no reproductor.

vergen sobre un territorio donde hay un puesto vacante; las aves luchan por el derecho a quedarse. Tales batallas, en las que participan hasta 50 aves y que duran varios días, consisten en persecuciones continuas y en exhibiciones territoriales ininterrumpidas.

Los vencedores ocupan la vacante; los derrotados retornan a su grupo paterno. Un significado ecológico subyace a estas luchas caóticas: los asistentes no reproductores están deseosos de batirse por la oportunidad de abandonar el grupo natal y criar por su cuenta. Tales luchas tienen sentido sólo si los buenos hábitats valen la pena y el esfuerzo de que los jóvenes se queden en el grupo paterno.

La falta de territorios marginales adecuados para la colonización por parte de grupos recién formados débese, aparentemente, a la confianza depositada por el picamaderos en el árbol-granero. El almacén es el resultado de la labor realizada por generaciones de picamaderos, perforando cada ave unos pocos agujeros por año. Debe alcanzarse una cota mínima que va desde varios cientos a mil agujeros de almacenamiento antes de que un territorio pueda ser ocupado de forma permanente. Cuando se ha perforado un número suficiente, el territorio puede ser ocupado de forma continua hasta que el árbol-granero cae. Las aves, individualmente, no pueden construir un nuevo granero en un período corto, ni, por ende, dispersarse hacia una nueva zona a menos de que ésta posea ya un árbol-granero. Los hábitats naturales escasean porque todos los graneros maduros están en territorios ocupados.

Otros investigadores, entre ellos Jerram Brown, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, y Stephen T. Emlen, de la Universidad de Cornell, han sugerido que las limitaciones ecológicas constituyen una de las muchas causas de la reproducción cooperativa en las aves. El estudio del picamaderos de las bellotas en distintas regiones ha permitido acometer la primera prueba cuantitativa de tal hipótesis. El nivel de saturación del hábitat puede medirse según el número de territorios que quedan vacíos en invierno, en cuya estación las aves jóvenes intentan abandonar el grupo natal.

En la reserva de Hastings la mayoría de los grupos almacenan bellotera suficiente para que dure todo el invierno, y por ello la mayoría de territorios se hallan ocupados continuamente. Sin embargo, en Water Canyon la cosecha de bellotas o de otras nueces es más variable; muchos grupos agotan el alimento almacenado y abandonan su territorio. El territorio vacío se halla luego disponible para su colonización. Tal como predice la hipótesis de la saturación del hábitat, en Water Canyon hay menos aves jóvenes que permanezcan en su grupo original durante un año o más que en la reserva de Hastings.

Pruebas adicionales de que la saturación del hábitat y la construcción de almacenes de bellotera son algunas de las causas de la cría cooperativa en el grupo de picamaderos de las bellotas provienen de un estudio realizado en Arizona sudoriental por uno de los autores (Stacey), en colaboración con Carl E. Bock, de la Universidad de Colorado en Boulder. Allí, la producción anual de bellotas está muy dispersa y varía de una temporada a otra. Hay pocos años en que los picamaderos logren almacenar suficiente bellotera para sustentar al grupo a lo largo del invierno. En consecuencia, los grupos no construyen graneros.

En lugar de ello, las bellotas recolectadas se almacenan en grietas y agujeros naturales de la corteza de los árboles. La capacidad del sistema de almacenamiento es pequeña, y por lo general la bellotera se ha agotado en otoño, poco después de que los robles dejen de producir su fruto. Cuando el almacén de alimento se ha vaciado, las aves abandonan su territorio y emigran a México para pasar el invierno. En primavera muchas de las mismas aves retornan y establecen nuevos territorios de reproducción. Debido a la migración anual la mayor parte del hábitat de cría está desocupada en invierno, razón por la cual en primavera hay mucho territorio disponible para su colonización.

La ausencia de territorios permanentes ejerce un efecto profundo sobre el comportamiento reproductor del ave. Contrariamente a lo que ocurre con las jóvenes aves de California (reserva de Hastings) y de Nuevo México (Water Canyon), los juveniles de Arizona sudoriental abandonan su territorio natal en otoño y no migran a México integrados en un grupo familiar. En primavera los adultos y los jóvenes del año retornan individualmente a Arizona; suelen criar en un nuevo territorio con una nueva pareja cada año. Más sorprendente es que, en Arizona, los picamaderos de las bellotas que migran no se reproduzcan cooperativamente. No hay asistentes no reproductores y el apareamiento se hace en parejas independientes.

De las investigaciones realizadas en la última década sobre el picamaderos de las bellotas han surgido nuevas ideas sobre la ecología y la organización social de los animales que crían cooperativamente. Estos estudios han producido un cuadro detallado del comportamiento reproductor del ave y de su sistema de apareamiento. Por encima de todo, la investigación ha puesto de manifiesto la complejidad de las relaciones entre los miembros de un grupo social aviar.

La evolución biológica favorece a los individuos que maximizan de forma conveniente su contribución genética a la siguiente generación, en relación a la contribución de los demás reproductores. Pero las estrategias por las que se aumenta la contribución genética no son simples. Las que adopta el picamaderos de las bellotas van desde la competencia genética directa que supone la destrucción del huevo de una hermana, o la matanza de las crías de otros miembros del grupo, hasta el comportamiento aparentemente altruista de compartir la pareja o de actuar como un asistente no reproductor. Investigaciones futuras en esta ave insólita revelarán sin duda otros métodos inesperados por los que un picamaderos de un grupo social puede aumentar su ventaja reproductora y, con ello, su eficacia evolutiva.

Juegos de ordenador

Una trampa computarizada del castor afanoso, la más productiva de las máquinas de Turing

A. K. Dewdney

Con la posible excepción de las abejas, los castores son los animales más activos. En las tranquilas aguas norteñas, todo el día se afanan llevando ramas y varitas a sus presas. Fue sin duda esta conducta la que indujo a Tibor Rado, de la Universidad estatal de Ohio, a bautizar con el nombre de "juego del castor afanoso" cierto problema que plantea la máquina de Turing. A principios del decenio de 1960, Rado se preguntaba cuántos 1 podrían hacérsele imprimir a una máquina de Turing antes de que se detuviera. Específicamente, si una máquina de Turing es capaz de adoptar n estados, y comienza a trabajar sobre una cinta totalmente ocupada por ceros, ¿cuál es el número máximo de unos que puede imprimir sobre la cinta antes de detenerse? La respuesta se conoce para los casos $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ y $n = 4$, pero no para $n = 5$, ni tampoco para los valores de n superiores a 5.

El año pasado se celebró en Dortmund, Alemania Federal, un concurso para ver quién lograba atrapar el más afanoso "castor" de cinco estados. A lo largo del año que precedió al concurso se compusieron programas destinados a generar máquinas de Turing "de competición", y se puso a punto el soporte físico necesario. En el curso de esos trabajos se descubrieron buen número de "castores" de extravagantes conductas, y se hizo necesario ampliar el género *Castor* con diversas especies hasta ahora desconocidas por los zoólogos.

La naturaleza de la máquina de Turing y su papel en las ciencias de cómputo han sido analizados hace poco en estas páginas por John E. Hopcroft, de la Universidad de Cornell [véase "Máquinas de Turing", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. Una máquina de Turing consta de una cinta de longitud ilimitada, un cabezal capaz de leer o escribir símbolos en la cinta y una unidad de control, capaz de tomar un número finito de estados [*véase la figura 1*]. Tales componentes pueden considerarse el soporte físico, o *hardware*, del dispositivo, mientras que los contenidos de la unidad de control son los logicales (soporte lógico o *software*), la programación de la máquina de Turing. Por el programa se distinguen unas máquinas de Turing de otras. El programa es una tabla que la máquina consulta cada vez que tiene que determinar la acción que debe emprender de seguido. Para cada posible estado de la unidad de control, y para cada posible símbolo que encuentre en su actual posición el cabezal de lectura, un asiento de la tabla le dice a la máquina qué símbolo debe imprimir sobre la cinta, en qué sentido debe desplazarse el cabezal y qué estado tomar a continuación. Todas las máquinas que aquí comentamos comienzan en el estado 1.

Las acciones que una máquina de Turing efectúa pueden repasarse registrando el estado de la unidad de control y los símbolos grabados sobre la cinta (o parte de ella) en los sucesivos pasos que va dando; convendría indicar también qué cuadrícula de la cinta se está inspeccionando en cada momento. La figura 2 es una "traza" correspondiente a la máquina de Turing mostrada en la figura 1. Cada línea de la secuencia es una "descripción instantánea" de la máquina. El formato de la descripción es algo distinto del de Hopcroft, pero la información que presenta es la misma. He hecho también que la lista sea ilimitada en ambos sentidos, y permitido también que sea impreso un símbolo en el curso de la transición final de la máquina (al tiempo de entrar en el estado de detención), contraviniendo en esto los convenios del artículo de Hopcroft. Son éstas diferencias que no afectan a lo que una máquina de Turing puede o no hacer. El formato aquí elegido para descripciones instantáneas es compatible con el utilizado en el certamen de castores atareados.

Un castor afanoso de n estados es una máquina de Turing de n estados que cumple dos condiciones. Primera, al ponerla en funcionamiento sobre una cinta totalmente ocupada por ceros acaba por detenerse; y segunda, el número de unos que imprime sobre la cinta no es inferior al que pueda imprimir cualquier máquina de Turing de igual número de estados que llegue a detenerse. En la figura 3 vemos castorcitos afanosos de uno y de tres estados. Cada máquina de Turing está representada por un diagrama de transición de estados, en el que cada estado es un círculo numerado, y una transición entre estados es una flecha. Los rótulos adosados a las flechas describen la acción de la máquina de Turing. Por ejemplo, supongamos que la máquina triestado se halle en estado 1, y sobre la cinta lea un 0. En estas circunstancias, la flecha que seguirá es la rotulada "0, 1, *D*" conducente al estado 2. Por tanto, la máquina, al haber leído un 0, imprime un 1 sobre la cinta, se encarga de desplazar el cabezal un cuadro hacia la derecha y entra en el estado 2.

El número máximo de unos que una máquina de Turing puede producir antes de detenerse se denota $\Sigma(n)$. Como anteriormente se hizo notar, el valor de $\Sigma(n)$ tan sólo se conoce para los cuatro primeros valores de n. El afanoso castorcito de un solo estado imprime un solo 1 antes de detenerse; esto es, $\Sigma(1)$ es igual a 1. Un castor biestado produce una secuencia de cuatro unos. ¿Sabrán los lectores diseñar una tal máquina? Una máquina triestado logra imprimir hasta seis unos; un castor de tres estados es precisamente la máquina cuyo programa y secuencia de descripciones instantáneas se muestran en la figura 1, y cuyo diagrama de transición está dado en la figura 3. El castor triestado fue descubierto en 1962 por Rado y Shen Lin, de AT&T Bell Laboratories. En 1973, Bruno Weimann, de la Universidad de Bonn, descubrió un castor afanoso de cuatro estados, cuyo egreso consta de 13 unos consecutivos. Desde entonces, los teóricos han perseguido el castor afanoso de cinco estados.

El certamen de castores afanosos, or-

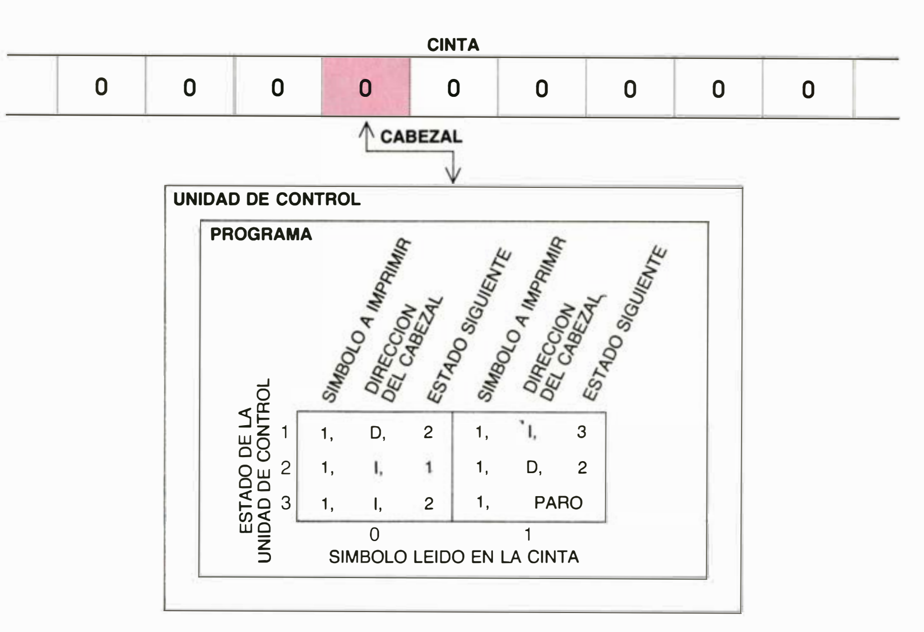
ganizado por Frank Wankmuller, se celebró en enero de 1983, en la Universidad de Dortmund, durante un congreso sobre informática teórica. Se inscribieron en el concurso 133 máquinas de Turing pentaestado. El vencedor fue Uwe Schult, de Hamburgo, con una máquina que produjo 501 unos antes de llegar a detenerse. En la figura 4 se muestra el diagrama de estados de la máquina ganadora. Segundo clasificado fue Jochen Ludewig, del centro de investigaciones de Brown Boveri en Baden. Su máquina de Turing imprimió 240 unos.

¿Será la máquina de Schult un afanoso castorcito? Schult, respaldado por Ludewig y Wankmuller, sostienen que sí. Con otras palabras, Schult sospecha que ninguna máquina de Turing pentaestado puede producir más de 501 unos, si es que ha de llegar a detenerse. ¿Cómo podrá demostrarse tal afirmación? La respuesta estaría en una búsqueda exhaustiva mediante ordenador, del tipo de la emprendida previamente por Schult para descubrir su máquina de Turing campeona. Antes de describir los esfuerzos de Schult para atrapar con su ordenador el afanoso castor de cinco estados, sería preferible ojear más de cerca la función $\Sigma(n)$ a fin de mejor comprender por qué es tan difícil el juego del castor atareado, incluso con ayuda de ordenador.

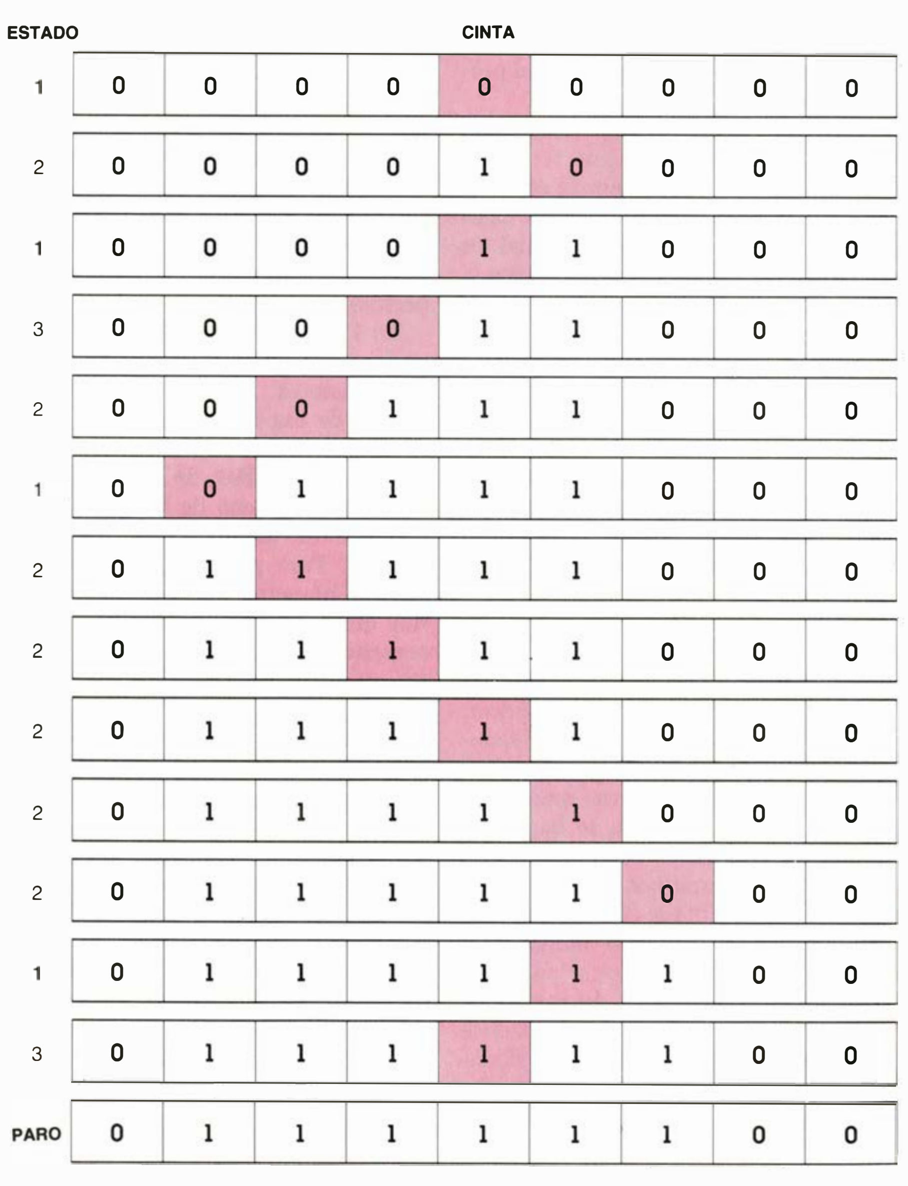
La función $\Sigma(n)$ tiene una extraordinaria propiedad, a saber, no es computable. Sencillamente, crece con demasiada rapidez. Vistos los cuatro primeros valores de $\Sigma(n)$, 1, 4, 6 y 13, pudiera parecer que su tasa de crecimiento es bastante moderada. Si realmente fuera 501 el número máximo de unos que puede imprimir la máquina pentaestado, el crecimiento de $\Sigma(n)$ seguiría aún pareciendo inferior al de una función exponencial. Schult ha descubierto una máquina de Turing de seis estados que produce 2075 unos, lo que sugiere una tasa de crecimiento perfectamente tratable.

Por otra parte, Schult ha dado también con una máquina de 12 estados que genera tantísimos unos que su número tiene que expresarse por la siguiente fórmula capaz de amedrentar la más bragada mente matemática:

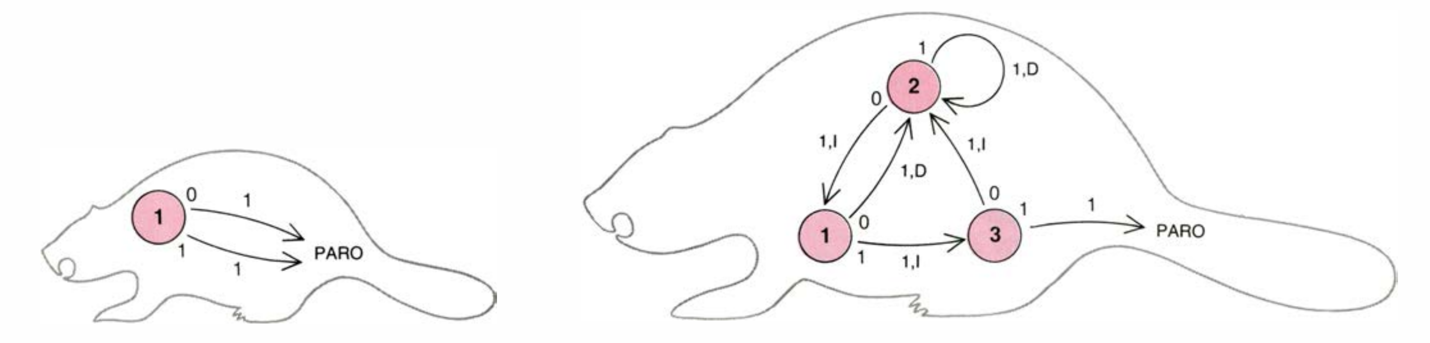
$$6 \times 4096^{4096^{\cdot^{\cdot^{\cdot^{4096^{4}}}}}}$$



1. Máquina de Turing con su programa



2. "Descripciones instantáneas", que van registrando los sucesivos estados de la máquina de Turing



3. Castores afanosos de uno y tres estados

El número 4096 figura 166 veces en la fórmula, de las que 162 están en la zona "de penumbra" representada por los puntos suspensivos. La fórmula puede calcularse de arriba abajo. Se eleva primero 4096 a la cuarta potencia; después, se eleva 4096 al resultado de la operación anterior, y después, vuelve a elevarse 4096 a la potencia del nuevo número, y así sucesivamente. Alcanzada la línea de base, se multiplica el producto obtenido por 6.

Será bien recibido todo aquel que, no dejándose intimidar por series de unos algo largas, construya de ellos un número todavía mayor. Escriba cualquier fórmula de su gusto en la cual los números se multipliquen, o eleven a potencia; puede incluso remplazarse los números por una n. No importa qué formula se idee: para algún valor de n suficientemente grande, el castor afanoso de n estados producirá más unos de los que la fórmula especifique. Se deduce que $\Sigma(n)$ no puede computarse para valores arbitrariamente grandes de n. Lo más que se puede hacer es calcularlo para unos cuantos valores pequeños de n.

Mal puede sorprender que para jugar al "castor afanoso" se suela echar mano del ordenador. En esencia, el método consiste en examinar sistemáticamente todas las máquinas de Turing de n estados. Cada vez que se genera una nueva máquina se hace una simulación de su comportamiento sobre una cinta totalmente ocupada por ceros. Si la máquina se detiene antes de llegar a un determinado número de pasos fijado de antemano, se compara el número de unos que ha sido capaz de imprimir con la puntuación de la máquina de Turing más diligente hallada hasta ese momento; de vez en cuando se descubre una nueva campeona.

Tal método de búsqueda del castor afanoso tiene dos fallos fundamentales. Primero, el número de máquinas de Turing a generar es inmenso. Por ejemplo, sólo de máquinas de cinco estados hay 63.403.380.965.376. Segundo, no se sabe cuánto hay que esperar a ver si la máquina alcanza a detenerse o no; el número máximo de transiciones que puede experimentar una máquina (para acabar por detenerse) es una función denotada $s(n)$, intrínsecamente no computable. Evidentemente, $s(n)$ crece todavía más deprisa que $\Sigma(n)$, pues una máquina de Turing ha de efectuar al menos una transición de estado cada vez que imprima un 1. Como hizo notar Hopcroft, computar $s(n)$ equivale a resolver el problema de la detención para máquinas de Turing, uno de los primeros problemas que Turing demostró indecidibles.

En 1982, Schult transformó su ordenador personal Apple II en una trampa para castores. Amplió el procesador central de esa máquina con una placa de circuito impreso provisto de un microprocesador 6809, de Motorola, y escribió su programa de búsqueda en el lenguaje de máquina del procesador auxiliar. Para poner a prueba los inmensos números de máquinas de Turing que generaba el programa, Schult construyó con componentes electrónicos de serie una máquina de Turing electrónica que, montada en otra placa de circuito, insertó en otro de los zócalos de expansión del Apple II. Tal ingenio proporcionaba una "cinta electrónica" de 4096 casillas, así como registros donde almacenar el programa y la posición del cabezal impresor. Schult estima que sin ese material auxiliar, especializado, la búsqueda que llevó a cabo hubiera requerido 20 meses de funcionamiento del ordenador. Incluso con esas ampliaciones, el Apple II necesitó 803 horas de funcionamiento para encontrar la máquina de Turing ganadora del concurso.

Al diseñar los logicales necesarios, Schult economizó no poco haciendo cooperar muy íntimamente al programa de búsqueda y al montaje que daba cuerpo a la máquina de Turing. El programa iba rellenando sistemáticamente, de todas las formas posibles, la tabla de transiciones de una máquina de Turing de cinco estados. Antes de que la tabla estuviera terminada, ya se presentaba al montaje-Turing, para ponerla a prueba. Se descubrió que, en muchos casos, tablas incompletas especificaban máquinas que agotaban el espacio o el tiempo de funcionamiento concedidos antes incluso de que les fueran dados los elementos que no figuraban en la tabla. De este modo podían rechazarse tanto la tabla incompleta como todos sus posibles rellenos.

Aunque Schult consiguió superar en buena medida el problema de manejar cifras astronómicas de máquinas de Turing, su enfoque del problema de los "castores afanosos" de cinco estados no es, por así decirlo, totalmente "estanco". Puesto que se carece de información exacta acerca de $s(5)$ –que es el número máximo de transiciones que puede llevar a cabo alguna máquina de Turing de cinco estados que acabe por detenerse– es preciso conjeturar de qué tamaño puede ser ese número. Schult situó el límite en 500.000 transiciones; en otras palabras, adoptó como hipótesis de trabajo que si una máquina, efectuadas 500.000 transiciones, no se había detenido, ya nunca lo haría. También tuvo, necesariamente, que imponer restricciones de espacio a sus aspirantes a castor afanoso; dado que su cinta electrónica sólo constaba de 4096 cuadrículas, y dado que sus máquinas de Turing comenzaban siempre a partir del centro de esta cinta finita, se consideraba que una aspirante "escapaba" en cuanto se apartaba más de 2048 cuadros de su posición inicial. Se dice que la máquina de Turing "escapa", o "echa a correr", si, además de ser incapaz de detenerse, visita incesantemente nuevos cuadros de la cinta.

De las 133 máquinas de Turing ins-

critas en el concurso de Dortmund, sólo cuatro llegaron a producir más de 100 unos. Para simular el funcionamiento de cada máquina de Turing se utilizó un ordenador Siemens 7748. Hizo falta más de una hora de funcionamiento del procesador para determinar la máquina vencedora.

Ludewig, el segundo clasificado, redactó su programa cazacastores en lenguaje Pascal, y lo hizo funcionar con un potente miniordenador, el VAX, que fabrica la Digital Equipment Corporation. A pesar de que su análisis de las máquinas de Turing candidatas fue más elaborado, se consumieron 1647 horas de procesador para descubrir la que sería su aspirante: la máquina de Turing que produjo 240 unos. También Schult, y ello no es sorprendente, descubrió la máquina de Ludewig; no menos interesante es que Schult no descubriera máquinas intermedias entre la de Ludewig y la suya. Al parecer, toda máquina de Turing de cinco estados que llegue a detenerse, si imprime más de 240 unos, tiene que imprimir al menos 501.

En el curso de su investigación, Ludewig descubrió cierto número de extrañas máquinas de Turing, de comportamientos castoriles. No es la de imprimir unos la única manera de tener atareada a una máquina. Por ejemplo, una máquina de Turing puede alejarse considerablemente de su casilla inicial, y detenerse. Alternativamente, sin imprimir muchos unos, y sin siquiera apartarse gran cosa de su posición inicial, puede pasar por un gran número de transiciones, y detenerse. Entre las máquinas ensayadas en Dortmund, la de Schult venció en las tres categorías. Por otra parte, Ludewig descubrió tres castores que no generan ni un 1, pero que, no obstante, o bien exploran un amplio territorio, o despilfarran mucho tiempo en actividades sin provecho [*véase la figura 5*]. Consecuentemente, se han incluido en la taxonomía tres nuevos castores:

Castor ministerialis (nombre vulgar: castor funcionario). Esta emprendedora criatura busca promocionarse y ascender tanto como sea posible sin producir nada. El espécimen tipo es un castor pentaestado, que no produce ningún 1 y que avanza 11 cuadros desde su posición inicial.

Castor scientificus (nombre vulgar, castor científico). Lo mismo que el anterior, tampoco este animal produce nada, pero la diferencia estriba en que éste busca hacer máxima su actividad total, quién sabe si en el vano intento de que le sean concedidas nuevas subvenciones a fondo perdido. Se ha observado un miembro de cinco estados, perteneciente a esta especie, que ha conseguido efectuar 187 transiciones sin escribir un solo 1.

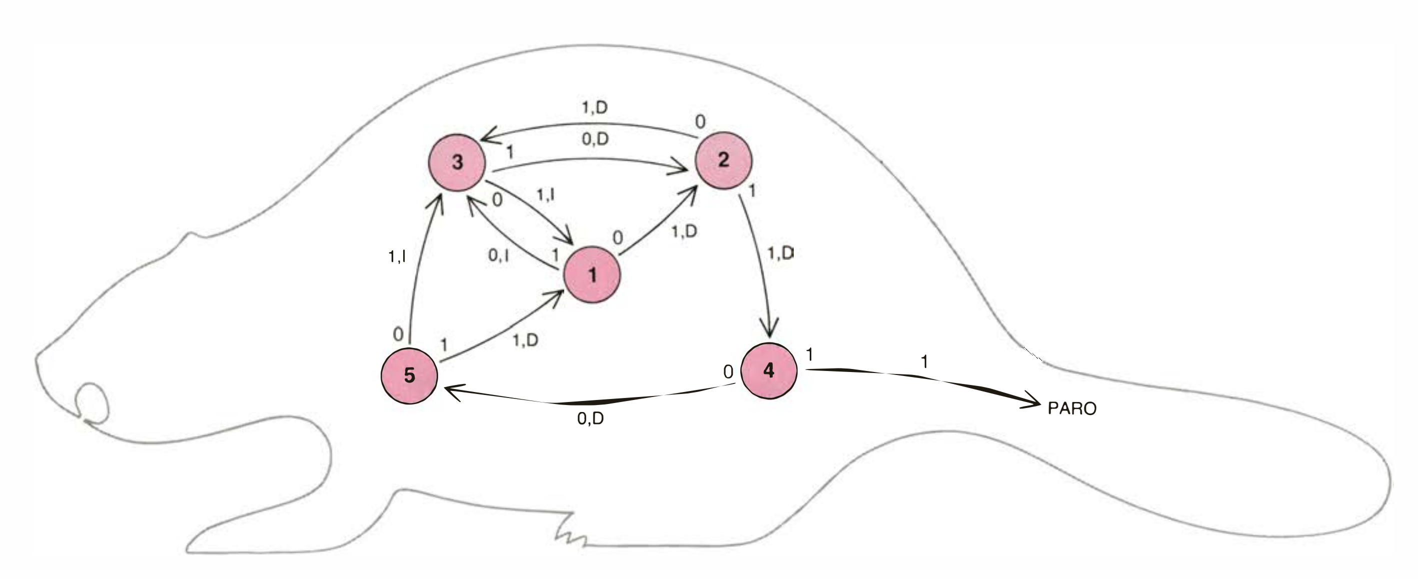
Castor circuitus (castor atolondrado). El castor mareado no produce nada, y no va a parte ninguna, pero en este proceso genera el máximo de actividad. Como ya hace pensar el diagrama de estados de transición, propende a pasarse todo el tiempo haciendo girar las ruedas en punto muerto. El más afanoso de los especímenes pentaestado hasta ahora observados pasa por 67 transiciones antes de detenerse, finalmente, en el punto exacto donde comenzó.

Sería interesante disponer de algunos ejemplos triestado de estos curiosos castores. En los intentos y esfuerzos que se hagan por capturarlos puede ser bienvenida la ayuda del ordenador (personal o no), aunque no sea más que para poner a prueba programas de simulación de máquinas de Turing que uno haya concebido.

Es fácil escribir un simulador de máquinas de Turing. Se utiliza una matriz unidimensional a modo de cinta; el contenido de esa matriz puede presentarse en la pantalla del ordenador. La presentación resulta más informativa si se indica también la posición del cabezal de impresión. El estado de la máquina en cada momento podría mostrarse directamente debajo del símbolo sujeto a inspección.

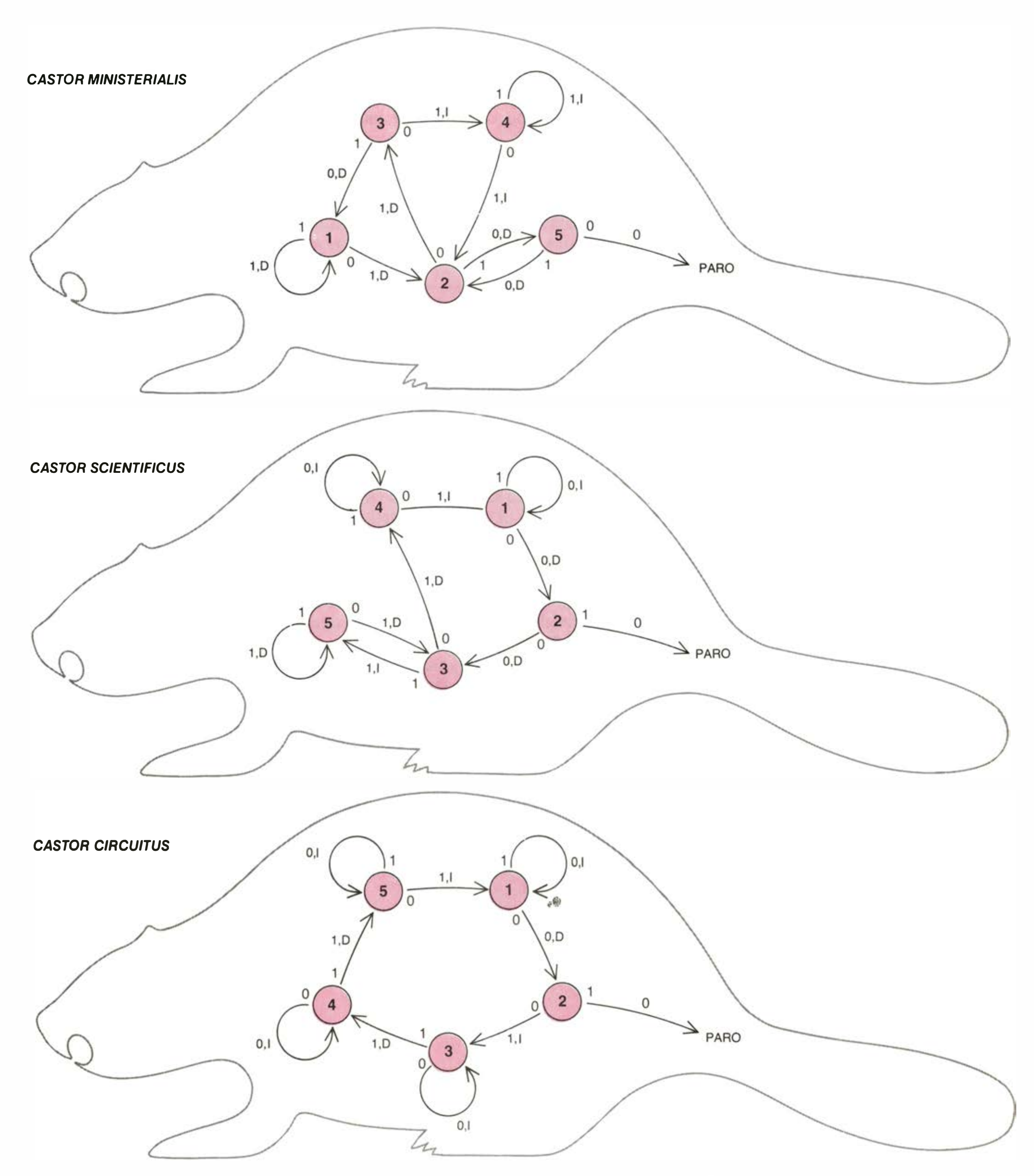
La representación del programa de la máquina de Turing requiere una matriz bidimensional. Cada elemento de la matriz es un juego de instrucciones para la máquina. Es preciso proporcionar las instrucciones correspondientes a cada estado de la unidad de control y cada posible símbolo inscrito en la cinta. En las máquinas de tres estados, la matriz habrá de tener tres filas y dos columnas; su estructura es exactamente la del programa que se muestra en la figura 1. El estado de la máquina especifica una fila de la matriz; el símbolo situado bajo el cabezal de lectura, la columna. Las instrucciones situadas en la intersección de la fila y columna designadas definen la siguiente acción de la máquina de Turing.

Supongamos que la máquina se encuentre en estado 1, y que el símbolo de la cinta sea un 0. Consultando la fila 1 y la columna 0 de la matriz, el simula-



4. Castorcito afanoso pentaestado, presentado por Uwe Schult

dor encuentra las instrucciones "1, *D*, 2". Por consiguiente, la máquina ha de escribir un 1 sobre la cinta, hacer avanzar al cabezal un paso hacia la derecha y entrar en el estado 2. Un modo de llevar a la práctica tales instrucciones es definir tres variables, que podemos llamar ESTADO, CABEZAL y SÍMBOLO. Al comienzo de un ciclo, los valores de ESTADO y SÍMBOLO determinan qué lugar de la tabla ha de consultar la máquina para conocer sus próximas instrucciones. El primer componente de la instrucción allí encontrada (en este caso, 1) es impreso en la cinta. El segundo componente (*D*) se convierte en nuevo valor de CABEZAL, y el tercer componente (2), se transforma en valor de ESTADO. Se traslada entonces el cabezal en la dirección indicada por CABEZAL, y el símbolo que se encuentre y lea



5. Tres nuevas especies de castores, que tras mucha actividad no dejan unos en la cinta

en la nueva posición pasa a ser el valor de SÍMBOLO. Seguidamente, recomienza el ciclo.

Para hacer más sencilla y eficiente la puesta en práctica de tal esquema caben distintas estrategias. Las letras *I* y *D* pueden sustituirse por números, por lo común más fáciles de manipular por el ordenador. Además, la transición conducente al estado de detención exige tratamiento especial por el programa.

Se podría utilizar un simulador de máquinas de Turing para comprobar las soluciones de los siguientes problemitas, aunque ninguno de ellos exige imprescindiblemente ordenador para resolverlos.

Supongamos que compramos en nuestra tienda de informática habitual un lote de máquinas de Turing de segunda mano. Antes de soltarle la correa a nuestro afanoso castor, es preciso limpiar las cintas, esto es, hay que reconvertir en ceros todos los unos que contengan. Y para hacerlo nosotros mismos, decidimos idear una máquina de Turing sencilla que efectúe ese trabajo por nosotros.

Una de las cintas tiene impreso un único 1; el resto de su contenido está formado por ceros. Es preciso idear una máquina de Turing que encuentre el 1, lo borre (cambiándolo por un 0) y se detenga. Como es natural, cuantos menos estados tenga la máquina limpiadora tanto más elegante. En este sentido, la limpiadora de la figura 6 es de una elegancia extrema. ¡Lástima que sólo funcione en la mitad de los casos!

Las restantes cintas son justamente como la primera, si bien el número de unos que contienen, aunque finito, es mayor que uno. ¿Sabrá el lector construir un limpiacintas que reconvierta en ceros todos los unos que le salgan al paso? Como es obvio, tal máquina nunca llegará a detenerse.

Las respuestas que suscitó el artículo de julio, que trataba de la "guerra nuclear", van desde simples peticiones de las indicaciones complementarias sobre el juego hasta descripciones completas de sistemas de juegos "nucleares" ya en funcionamiento. Entre ambos extremos se sitúa un rico anecdotario de programas tipo "cizaña", residentes en sistemas reales (sin que faltasen gusanos en Apples), comparaciones de los programas con los genes, ni especulaciones acerca de estrategias defensivas y ofensivas. Tan sólo podré mencionar aquí unos cuantos desarrollos importantes; los demás tendrán que esperar hasta un futuro artículo sobre la cuestión, que confío pueda aparecer en los primeros meses del año que viene.

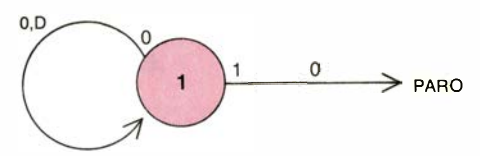
Douglas B. McIlroy, de AT&T Bell Laboratories, me informó que no fue él quien inventó el juego llamado Darwin, sino Victor A. Vyssotsky, también de la misma institución. Lo que McIlroy sí hizo fue inventar un organismo imposible de aniquilar.

¿Qué sucede cuando un Trasgo se topa con un Enano? En el artículo de julio se explicó una posibilidad: el Enano transfiere el control al código del Trasgo, y se convierte en un segundo Trasgo que persigue infatigablemente al Trasgo primero. Otro de los posibles resultados tiene el efecto justamente contrario. Supongamos que el Enano acaba de saltar a su primera instrucción cuando el Trasgo se copia a sí mismo sobre la localización de datos del Enano. La situación es entonces la siguiente:

```
Trasgo → MOV   0     1
Enano  → ADD  # 5   − 1
         MOV  # 0  @ − 2
         JMP  − 2
```

Dado que es el turno de Enano, suma 5 al código del Trasgo, convirtiéndolo en MOV 0 6. Es entonces el turno del Trasgo, quien se copia a sí mismo seis espacios más adelante, hurtándole el cuerpo al Enano, el cual bombardea ahora su dirección siguiente (especificada por el código numérico correspondiente a MOV 0 6). En el siguiente turno del Trasgo acontece algo curioso: ejecuta la primera línea del programa del Enano, con lo cual durante un tiempo la partida la está jugando un "doble Enano", que va disparatadamente atacando toda la formación de núcleos, ¡mientras el objeto de sus ataques habita en su propio cuerpo y va haciendo exactamente lo mismo!

David Menconi, de Milpitas, California, diseñador de juegos de Atari, ha propuesto convertir este fenómeno en una característica de la "guerra nuclear", permitiendo que cada programa de combate se ejecute en dos lugares al tiempo. Aun cuando un programa pierda una de sus 'vidas', un segundo 'ser' podría ser capaz de reparar los daños. Edsel Worrell, de Bethesa, Maryland, sugiere un esquema algo más general, donde cada programa tiene *n* 'vidas', todas ejecutadas a la vez en distintos lugares de la memoria.



6. Una máquina limpiacintas

Robert Peraino, de la Universidad George Mason, escribió un programa de "guerra nuclear" para el ordenador Apple II+; para compensar el pequeño tamaño de la palabra en esta máquina, utilizó una matriz bidimensional de 2000 por 2 octetos. Bill Dornfield, de AMF. Inc., redactó un sistema completo de guerra nuclear para el BASIC ampliado de un ordenador de sobremesa Hewlett-Packard 9816/26.

El sistema que más impresión me ha causado de los recibidos hasta hoy lo prepararon tres estudiantes de segundo ciclo, Gordon J. Goetsch y Michael L. Mauldin, de la Universidad Carnegie-Mellon, y Paul G. Milazzo, de la Universidad Rice. Mauldin hizo una exhibición del programa en un ordenador VAX instalado en nuestro Departamento, en la Universidad de Ontario Occidental. Con un grafismo impresionante, se proyecta en la pantalla del ordenador la formación completa de núcleos, señalándose con letras mayúsculas la posición de los programas adversarios, y con letras minúsculas las correspondientes, las zonas afectadas por el programa.

Mauldin ha inventado un programa de combate, llamado Mortero, que funciona como el Enano, salvo en que va lanzando sus bombas en las direcciones indicadas por la sucesión de números de Fibonacci (1, 1, 2, 3, 5, y así sucesivamente; cada número es suma de sus dos antecesores). Resulta curioso que Enano venza a Mortero en un 60 por ciento de las veces, mientras que Mortero mate sistemáticamente a un programa autorreparador, formado por tres secciones, llamado Votante. Por otra parte, Votante resiste bien los ataques de Enano, a quien vence regularmente.

Goetsch, Mauldin y Milazzo, que han analizado a Mortero, han llegado a la conclusión de que si un programa tiene más de 10 instrucciones, para vencer a Mortero tendrá que ser de tipo autorreparador. Por otra parte, ningún programa que conste de más de 141 instrucciones podrá regenerarse con la celeridad necesaria para sobrevivir a los ataques de Mortero.

Taller y laboratorio

Cavilaciones en torno a la caída de una hilera de fichas de dominó y de las reacciones en cadena

Jearl Walker

Lorne A. Whitehead, de Vancouver, Columbia Británica, propone una singular variante al proceso de derribo de una hilera de fichas de dominó. Consiste en emplear, en lugar de fichas del mismo tamaño, otras que sean cada una de ellas 1,5 veces mayor que la precedente. Así, en una fila de 13 fichas, un golpecito a la primera, que es diminuta, tumba sin dificultad a la última que es 64 veces mayor. Si Whitehead hubiera podido continuar aumentando el tamaño de las fichas en esa misma proporción, la trigésimosegunda habría tenido el tamaño de una de las torres gemelas del World Trade Center de Nueva York.

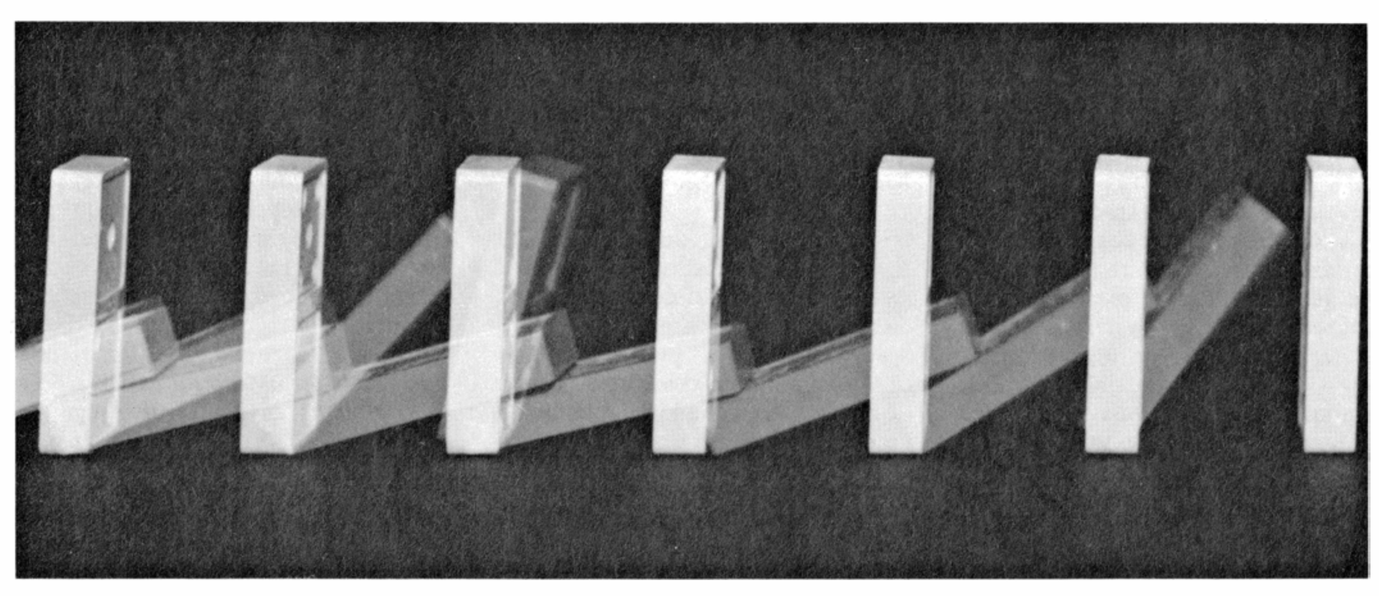
Para iniciarme en el tema comencé por examinar de qué modo vuelcan las fichas normales. Formé una hilera de cincuenta de ellas. Estando separadas un ancho de ficha, la reacción en cadena duró dos segundos. Con una separación mitad de la anterior, la reacción duró la mitad. Esa diferencia pude apreciarla al oído, merced a la secuencia de choques en ambos ensayos. La rapidez de la secuencia cambiaba, además, notablemente, una vez que la reacción pasaba por las cinco o seis primeras fichas; posiblemente porque en un primer período sólo estaban en movimiento unas pocas, mientras que, luego, en cada instante había más en proceso de caída.

Inmovilizando la acción con una instantánea o una luz estroboscópica conseguí observar la evolución de la reacción en cadena. Cuando la primera ficha del subgrupo en movimiento se encuentra cayendo hacia la siguiente, ésta todavía inmóvil, aquélla tiene a la precedente apoyada contra sí. Pero en el grupo en movimiento hay varias fichas más también apoyadas y cayendo. En su estudio teórico de la reacción en cadena, D. E. Shaw, de la Universidad de Villanova, halló que en cada instante había del orden de cinco fichas moviéndose.

Después examiné el ascenso y descenso de la reacción por una pendiente suave. Para ello hay que utilizar un plano poco inclinado; si no, sería imposible colocar las fichas de pie. Cuando la reacción debía subir por una pendiente de la inclinación adecuada, había que separar las fichas más que al hacer la experiencia en horizontal. Las reacciones pendiente abajo eran mucho más rápidas y salían bien para cualquier separación menor que la altura de una ficha. Se conseguía, asimismo, que la reacción superase un corto tramo de escalones poco altos, pero se desarrollaba con pesada lentitud.

Puede lograrse también que una cadena de fichas de dominó se divida en dos. Aquí, en la bifurcación, la última ficha de la cadena original cae sobre las primeras de las cadenas nuevas. Otra cosa que puede hacer una reacción en cadena es dar vueltas, lo que indica que no es necesario que una ficha golpee frontalmente a la siguiente.

Para entrar en la mecánica del vuelco de las fichas de dominó consideré una ficha convencional de altura h, anchura w y grueso d. ¿Qué factores responden de la estabilidad de una ficha puesta de pie? Si deseamos derribarla, ¿con qué fuerza golpearemos en una de las caras para que rote alrededor de un borde? ¿Por qué cuesta más derribar una ficha



1. Caída en cadena de fichas de dominó

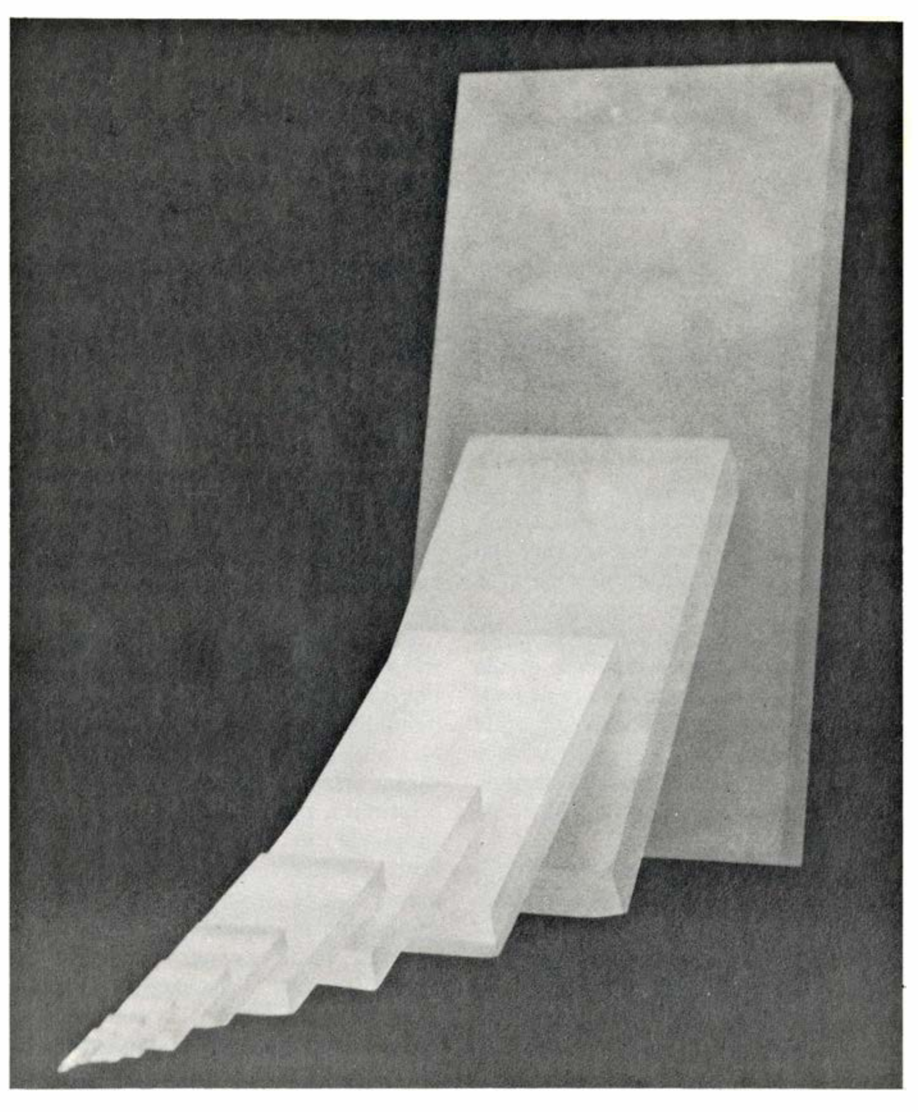
cuanto más gruesa es? ¿Por qué es imposible abatir en cadena una fila de cubos como los de los juegos infantiles?

Consideremos una ficha puesta de pie. La gravedad atrae hacia abajo todas las partículas que la componen. Un modo más sencillo de contemplar la situación es a través del concepto de centro de masa, que, en este caso, se halla en el centro geométrico de la ficha. Se dice entonces que toda la atracción gravitatoria (el peso de la ficha) actúa en ese punto. La ficha en pie es estable porque el vector que representa el peso apunta hacia el área de apoyo.

En principio es posible dar a la ficha otra posición estable inclinándola alrededor de una de las aristas inferiores hasta que el centro de masa se encuentre encima de esa arista. Entonces, aunque el peso sigue apuntando hacia la zona de apoyo, el equilibrio es precario: basta una pequeña fuerza para destruirlo y tumbar la ficha. Para derribar una pieza hay que golpearla de modo que se incline hasta más allá de esa posición de estabilidad precaria. (Partimos de la hipótesis de que el rozamiento con la mesa es suficiente para impedir que la ficha resbale. ¿Podría desarrollarse nuestra reacción en cadena sobre una mesa exenta de rozamiento?)

La ficha, al ladearse, pone en juego dos formas de energía. La energía cinética depende de la rapidez con que se inclina. La energía potencial depende de la altura del centro de masa sobre la mesa. Cuando golpeamos una ficha, le comunicamos energía cinética, pero ésta se convierte en energía potencial a la vez que el centro de masa se eleva. ¿Cuál es la energía mínima que podría comunicarse a una ficha para que rebase apenas la posición de estabilidad precaria? Inicialmente el centro de masa se encuentra a una altura $h/2$ sobre la mesa. Cuando ocupa la posición más alta durante la rotación, de la mesa la separa una distancia r (la existente entre el centro de la ficha y una de las aristas inferiores de la misma).

Si es m la masa de la ficha, el peso de ésta será mg (siendo g la aceleración de la gravedad). Su energía potencial en cualquier instante de la rotación es el producto del peso por la altura del centro de masa respecto a la mesa. Por ello, para elevar el centro de masa desde una altura $h/2$ hasta una altura r, hay que suministrar a la ficha una energía $mg(r-h/2)$. Si con el golpe le cedemos menos energía, la ficha no podrá rebasar la posición de estabilidad precaria y caerá hacia atrás, a su posición original. Si le cedemos más energía, la ficha volcará.



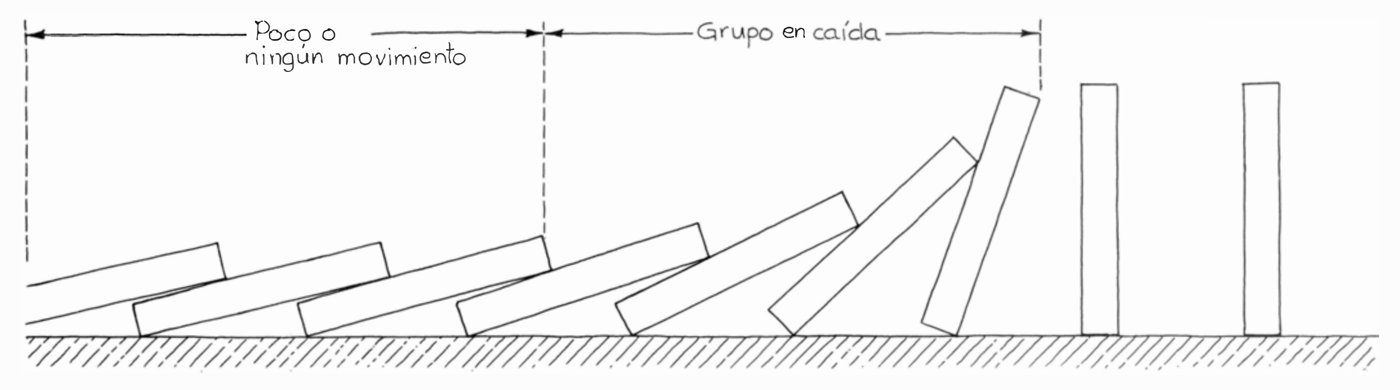
2. Variante de Lorne A. Whitehead con fichas de tamaño creciente

La clave de la inestabilidad de una ficha de dominó puesta de pie reside en su escaso grosor. Consideremos una ficha de altura y anchura determinadas. Si es delgada, r y el peso serán menores y hará falta poca energía para alzar el centro de masa hasta la posición de estabilidad precaria; bastará un leve golpecillo con el dedo. Pero si la ficha es más gruesa, todos los demás factores (r, el peso y la energía) serán mayores y con un pequeño golpe con el dedo no se le comunicará energía suficiente hasta el punto de derribarla.

La rotación de la pieza se debe al momento de giro creado por el golpe; el momento es el producto de esa fuerza por el brazo de palanca. En la figura 6 se indica cómo determinar el brazo de palanca. Se prolonga el vector representativo de la fuerza. Luego, desde la arista alrededor de la cual gira la ficha, se traza un segmento rectilíneo perpendicular a la prolongación de la fuerza. Ese segmento es el brazo de palanca. Para que se desarrolle un gran momento que haga rotar rápidamente a la ficha, hay que golpear alto en la cara de ésta y conseguir así un brazo de palanca grande.

Cuando la pieza gira, su peso crea otro momento que tiende a devolverla a su posición original. Para determinar el brazo de palanca de ese momento se prolonga el vector representativo del peso. Luego, desde la arista alrededor de la cual gira la ficha, se traza un segmento rectilíneo perpendicular a la prolongación del peso. Este segmento es el brazo de palanca asociado al peso de la ficha. Cuando ésta gira hacia arriba, tal brazo de palanca se acorta y disminuye el momento de giro desarrollado por el peso.

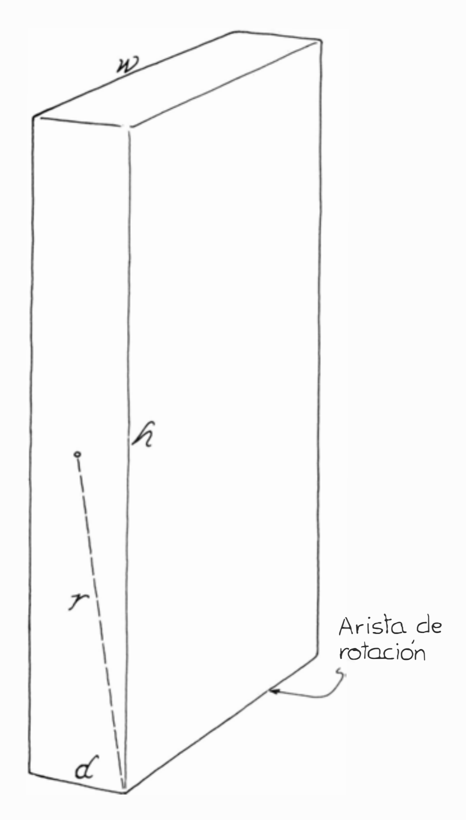
En la ilustración, el momento de la fuerza tiende a hacer rotar la ficha en



3. Reacción en cadena

sentido horario, mientras que el del peso actúa en sentido contrario. Como la fuerza actúa muy brevemente, su momento dura asimismo muy poco. Y durante la rotación subsiguiente el único momento actuante es el del peso. Para abatir la ficha, el momento que le apliquemos debe proporcionar una velocidad de rotación suficiente para que el momento del peso no pueda detener el movimiento antes de que el centro de masa haya pasado por la posición de estabilidad precaria.

Es muy poco probable que un golpecillo con el dedo pueda volcar un bloque de juego infantil. Esta pieza es gruesa y, por ello, el brazo de palanca inicial correspondiente al momento del peso es grande. Mas aún, su peso es considerablemente mayor que el de una pieza de dominó de la misma altura y anchura. Por ambas razones, el momento del peso se impone fácilmente al de la fuerza del golpe.



4. Símbolos empleados en los cálculos

Pasé luego a la cuestión de cómo derribar una ficha de dominó de modo que colisione con una segunda. Obviamente, la distancia entre las dos fichas ha de ser inferior a su altura o no chocarán. ¿Hay una separación mínima? Si la primera pieza se golpea con fuerza suficiente, es seguro que la segunda caerá en tanto que la separación sea menor que la altura de ambas. Supongamos que el impulso que damos a la primera baste apenas para que la misma traspase la posición de estabilidad precaria. Entonces, la segunda sólo caerá si su separación de la primera es superior a una cierta distancia (llamémosla distancia mínima).

Mis experiencias las he realizado con fichas de dos tamaños. Uno de los juegos se componía de piezas de plástico corriente de 4,4 centímetros de altura, 2,2 centímetros de ancho y 0,7 centímetros de grueso. El otro juego lo componían grandes piezas de madera de 13,9 centímetros de altura, 7 centímetros de ancho y 1,9 centímetros de grueso. El ancho no influye salvo por su contribución al peso. El cociente altura/grueso, que sí influye, era casi el mismo en ambos juegos.

Con cinta adhesiva fijé a una mesa una hoja de lija fina y a ésta, con más cinta, acoplé una regla. La lija proporcionaba el rozamiento suficiente para que no resbalasen las fichas. Al borde de la regla adosé, de pie, dos fichas pequeñas. Dejando inalterada la posición de la segunda, me puse a variar la distancia entre una y otra, desplazando la primera. En cada prueba soltaba la primera ficha desde su posición de estabilidad precaria, prácticamente sin energía cinética. Para conferir a la ficha esa orientación la separación debía ser de 0,7 centímetros al menos. Para que la primera pieza tumbase a la segunda la separación debía ser al menos de 1,2 centímetros. Para cualquier separación comprendida entre 0,7 y 1,2 centímetros, la primera ficha acababa simplemente apoyada sobre la segunda que se mantenía de pie.

Con las fichas grandes los resultados fueron similares. Para soltar la primera desde su posición de estabilidad precaria la separación debía ser al menos de 1,9 centímetros. Para derribar la segunda la separación debía ser de 2,3 centímetros, al menos.

La distancia mínima la determina la energía. Abatirá la segunda pieza en el caso de que la colisión transmita una energía suficiente para que el centro de masa se eleve hasta la posición de estabilidad precaria. Esta energía crítica vale $mg(r-h/2)$. Imaginemos un choque ideal, en el que, en el momento del contacto, toda la energía de la primera pieza se transfiera a la segunda. ¿Qué recorrido hará la primera desde su posición más elevada para comunicar a la segunda una energía capaz de tumbarla? Respuesta: la primera pieza debe caer desde un punto situado a la misma altura hasta la que deba elevarse el centro de masa de la segunda. O sea, debe caer desde una altura de $(r-h/2)$.

Admitiendo que en el choque la cesión de energía sea total, esta condición define el valor de la distancia mínima entre las piezas. Cuando la separación sea demasiado pequeña, la primera ficha no podrá hacer un recorrido suficientemente largo para adquirir la energía necesaria. En estos casos, la segunda ficha rota levemente y, con un tambaleo, retorna a su posición inicial.

¿De qué modo influye la distancia mínima en el desarrollo de una reacción en cadena en una hilera de fichas de dominó? Supongamos que las piezas se hayan dispuesto tan cercanas entre sí que la primera no alcance su posición

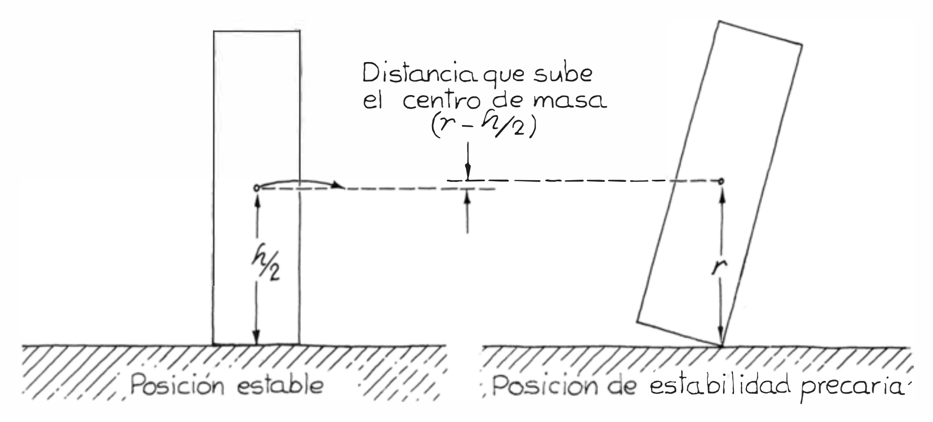
de estabilidad precaria sin topar con la siguiente. El golpe inicial tendrá que ser muy fuerte, pues deberá hacer que la cadena se incline toda de una vez.

Si las fichas están más separadas, pero mantienen una distancia inferior a la mínima, en la primera hará falta un buen golpe para dotarla de una energía cinética suficiente tras haber pasado por su posición de estabilidad precaria. Esa energía adicional se necesita porque la ficha no puede hacer una caída más larga antes de chocar con la siguiente. Así, la segunda volcará, no a causa de la energía de caída de la primera, sino a causa de la energía extra que le comunica el impacto.

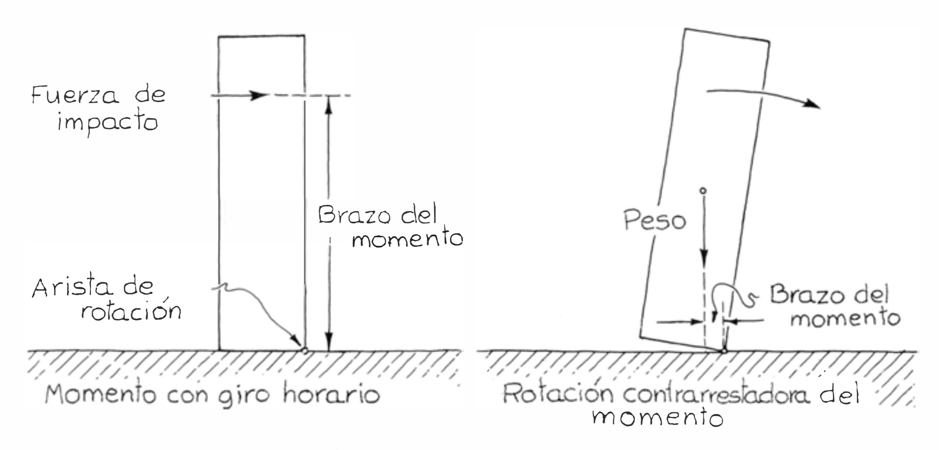
La distancia mínima importa cuando la primera pieza posee una energía suficiente para atravesar su posición de estabilidad precaria. Entonces, la segunda deberá superar la distancia mínima para que la primera pueda hacer un recorrido de caída suficiente. Sólo así podrá comunicarse a la segunda pieza una energía que alcance a tumbarla. Con un golpe flojo en la primera ficha puede iniciarse la reacción si todas ellas están separadas una distancia superior a la mínima e inferior a su altura. Si la separación es inferior a la distancia mínima, el golpe iniciador debe comunicar a la primera ficha una energía sustancialmente mayor para que se produzca la reacción en cadena.

Con mi ordenador personal calculé aproximadamente los valores de la distancia mínima para fichas de distintos tamaños. Partí de la hipótesis de que en la colisión se traspasa completamente la energía de cada ficha a la siguiente. Supuse además que, después, el desplome de la primera contribuía a empujar a la segunda hasta pasada su posición de estabilidad precaria. Para hallar la distancia mínima impuse que la primera pieza rebasase sin energía cinética su posición de estabilidad precaria. Para comunicar a la segunda una energía suficiente, el centro de masa de la primera debe estar a una altura de $h/2$.

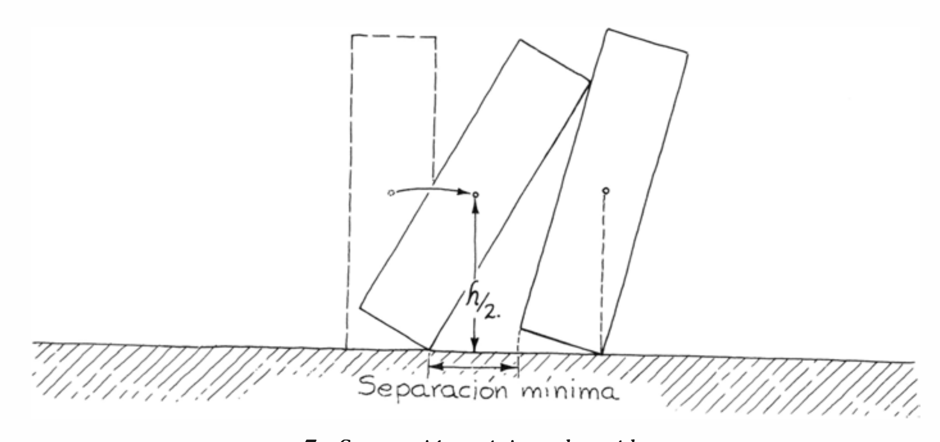
Según mis cálculos la distancia mínima para las piezas pequeñas debía ser de 0,7 centímetros y de 1,9 centímetros para las grandes. Estos valores resultaban menores que los experimentales, debido principalmente a que supuse una transmisión de energía perfecta. Pero, en una reacción en cadena real, parte de la energía se pierde por oscilación de las fichas y por rozamiento entre éstas cuando se tocan. Al lubricar las caras de las piezas, los valores experimentales de la distancia mínima disminuyeron, aunque levemente, lo cual



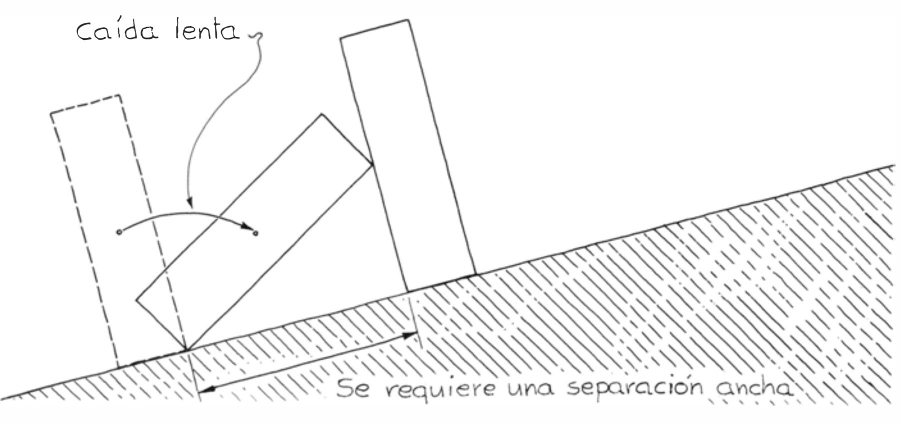
5. Cómo se eleva el centro de masa



6. Momentos en una ficha



7. Separación mínima de caída



8. Disposición para que las fichas caigan pendiente arriba

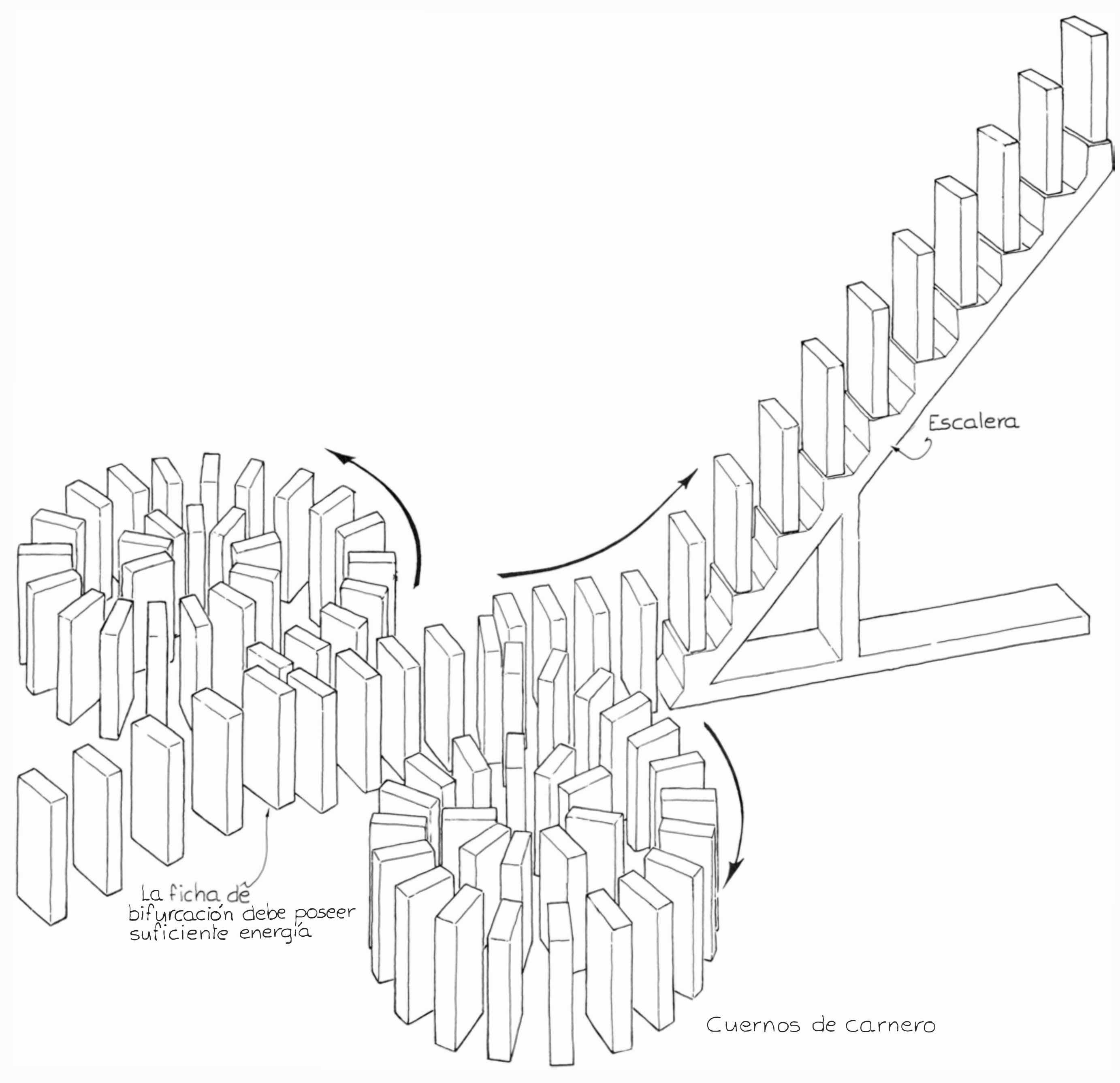
me reveló que la oscilación contribuía más que el rozamiento a la pérdida de energía.

Para conseguir unas piezas dos o tres veces más gruesas que las originales uní con pegamento algunas de éstas. Al repetir las experiencias, hallé que las fichas de un grueso doble requerían una separación mínima de 2,2 centímetros. (El ordenador me dio 1,5 centímetros: otra vez las pérdidas de energía en los choques reales respondían de la diferencia.) Las de grueso triple casi conseguían derribar una contra la siguiente, pero en el último instante el rozamiento las retenía, dejándolas sesgadas.

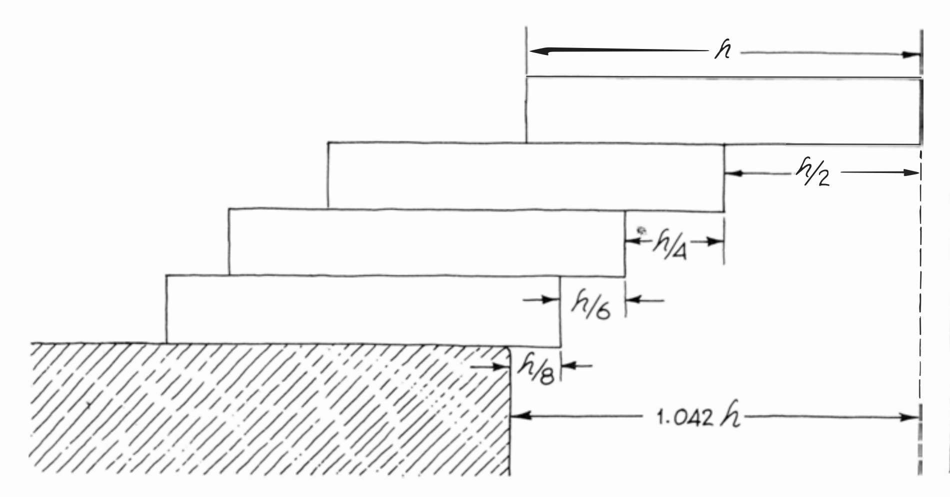
Mis cálculos mostraron que la separación mínima necesaria aumenta con el grueso de las fichas. La razón de ello es que cada una debe caer a lo largo de un recorrido mayor, al objeto de adquirir energía suficiente para tumbar a la siguiente. Cuando esa separación mínima se hace casi igual a la altura de la pieza, la transferencia de energía es inoperante y la reacción en cadena se detiene. Es imposible derribar una fila de cubos con una reacción en cadena, porque la distancia mínima necesaria es mayor que la altura de los mismos.

Regresé a mis primeros ensayos. Normalmente, una reacción en cadena se inicia con un golpe seco y enérgico sobre la primera ficha. Así, cada una de éstas pasa por su posición de estabilidad precaria con una energía más que suficiente. De aquí que, aunque las piezas estén muy cerca unas de otras y tengan escasa posibilidad de caerse, las colisiones las impulsan sin dificultad hasta más allá de sus posiciones de estabilidad precaria. Además, la energía cinética que lleva la onda es suficientemente elevada para que ésta pueda dividirse al llegar a una confluencia de cadenas y proseguir a lo largo de éstas.

La reacción puede desencadenarse en un plano inclinado con tal que éste no sea demasiado empinado. Aquí el peso es un vector que apunta hacia la cara más baja de la ficha. Además, puede verse que éstas deben estar más separadas que cuando se colocan en una superficie horizontal.



9. Cadena en cuernos de carnero y cadena escalonada



10. Apilamiento con la ficha de arriba totalmente volada

Voladizo en altura de fichas	Numero de fichas necesarias
.5	1
1	4
2	31
3	227
4	1,674
5	1.2×10^4
10	2.7×10^8

11. Datos sobre apilamientos

Fijémonos en la segunda ficha de la cadena. Por estar inclinado el plano, el centro de masa debe elevarse bastante más para alcanzar y pasar por la posición de estabilidad precaria. En virtud de ello la pieza voltea más lentamente que sobre un plano horizontal. Y hace falta más energía para el derribo. Entonces, para que la energía que, por choque, cede cada ficha a la siguiente sea importante, aquella debe hacer una caída más larga. Por tanto, la separación mínima será mayor y la reacción en cadena avanzará más lentamente.

Al descender por una pendiente la reacción en cadena progresa con mayor celeridad. Aquí, cada ficha necesita sólo una pequeña energía para pasar por su posición de estabilidad precaria. La separación mínima será esencialmente nula; más aún, el recorrido de caída no ha de ser muy largo para que cada pieza derribe a la siguiente, por lo que el tiempo entre vuelcos es muy breve.

Con las fichas escalonadas el derribo es lento. Dado que cada ficha golpea a la siguiente en un punto bajo del frente, el brazo de palanca que da el choque es pequeño y, pequeño también, el momento correspondiente. La transferencia de energía será asimismo ineficaz. Cada ficha alcanzada se elevará despacio hasta su posición de estabilidad precaria, con lo que la velocidad de la reacción se mantendrá baja.

La exhibición de Whitehead con las fichas de dominó de tamaño creciente es asombrosa. La primera ficha, pequeñísima, apenas puedo colocarla de pie. La última (la décimotercera) pesa tanto que me cuesta levantarla para colocarla en posición. No obstante, la reacción en cadena que inicia la ficha diminuta tumba sin dificultad a la última.

Como cada pieza es 1,5 veces mayor que la precedente en todas sus dimensiones, la última no sólo es 64 veces mayor que la primera, sino que, además, pesa 262.144 veces más. Con su centro de masa 64 veces más alto que el de la primera su energía potencial resulta casi 17 millones de veces mayor. Un golpecito leve a la primera ficha comunica a ésta una energía potencial de 0,024 microjoule. La energía cinética de la última, al final de su caída, es de 51 joule aproximadamente; o sea, de unas dos mil millones de veces la energía comunicada a la primera.

Estas fichas las construyó Whitehead a partir de láminas de plástico acrílico, chorreándolas con arena para pulirlas. Para hacer las mayores contrachapó varias láminas finas. Al alinear el conjunto de las 13 piezas, para desencadenar la reacción, cada una de ellas está separada de la siguiente en tamaño una distancia del orden de su propia anchura.

¿Podría diseñarse una cadena de fichas de dominó con un factor de escala superior a 1,5? Suponiendo que en los choques la transmisión de energía sea ideal, mi parecer es que 2,5 aproximadamente es el factor de escala límite para piezas conformadas al modo de Whitehead. Son posibles factores mayores si se aumenta el cociente altura/grosor. Quizá resulte entretenido experimentar por este camino.

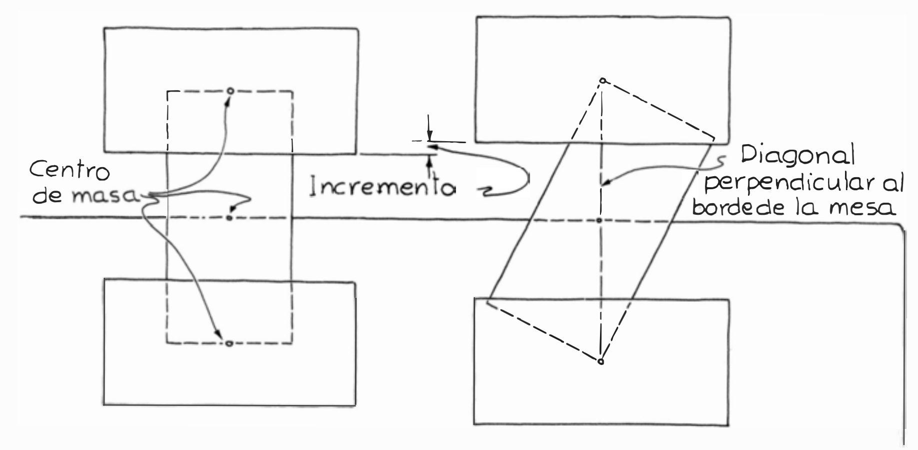
Y ahora un pasatiempo. La cuestión es apilar piezas de dominó en el borde de una mesa de manera que el montón sobresalga del borde cuanto sea posible, sin que caiga al suelo. Cada ficha se coloca con una cara boca abajo y la dimensión mayor perpendicular al borde de la mesa. ¿Cómo disponer las fichas para que la de más arriba esté máximamente desplazada respecto al borde? ¿Cuál es el menor número de fichas necesario para que la ficha superior esté del todo separada del borde? ¿Hay un límite para la distancia al borde hasta la que pueda prolongarse la pila de fichas?

En 1955 Paul B. Johnson planteó un problema de este tipo. La solución la simplificó posteriormente Leonard Eisner, quien la utilizó además para gastar una broma. Una noche, él y otros estudiantes de la escuela para graduados donde cursaban construyeron una pila inclinada sirviéndose de los volúmenes de *The Physical Review* de la biblioteca, dejando aquel desconcertante voladizo a la sorpresa del bibliotecario. (Probablemente eran demasiado jóvenes para saber que, para gozar del favor de los bibliotecarios, e incluso para que a uno no lo expulsen de la universidad, es mejor no enredar con los volúmenes de la biblioteca.)

Consideremos la primera ficha colocada. Esta será estable en tanto su centro de masa se encuentre sobre la mesa de modo que el peso no produzca un momento. El voladizo estable máximo lo tendremos cuando el centro de masa esté casi encima del borde.

Coloquemos ahora una segunda ficha debajo de la anterior. Entonces, el borde exterior de ésta hará el papel del borde de la mesa en lo referente a la rotación de la ficha de arriba. ¿Cómo instalar la pareja sobre la mesa? El centro de masa de la combinación de las dos fichas, que equidista de los centros de masa de ambas, deberá situarse encima del borde de la mesa para obtener el voladizo estable máximo. Aquí no se necesitan cálculos. Tras un poco de tanteo se encontrará la posición estable.

Al introducir una tercera ficha bajo las dos primeras, el centro de masa combinado de las tres debe estar encima del borde de la mesa. Y así podemos proseguir indefinidamente. Con



12. Cómo conseguir con tres fichas que una de ellas vuele por completo

una pila de n piezas, la distancia entre el borde del mueble y el borde exterior de la ficha de arriba viene dada por la serie $(h/2)$ $(1+1/2 + 1/3 + 1/4 + \ldots + 1/n)$, donde h es la dimensión mayor de la ficha y la expresión del segundo paréntesis es la serie armónica.

Programé mi ordenador para sumar aquella expresión para cualquier número de fichas. Para que el voladizo exceda de h, de modo que la ficha superior esté del todo separada de la mesa, se requieren al menos cuatro piezas. Para que tal separación sea de dos longitudes deben apilarse 31 fichas. A partir de aquí el número crece rápidamente. Para que la última ficha esté a cinco longitudes de la mesa se necesitarían 12.367 fichas, y $1{,}5 \times 10^{44}$ para que esté a cincuenta longitudes.

El cálculo del valor de la expresión del voladizo máximo resulta sencillo para un ordenador hasta que empiezan a considerarse números de fichas del orden del millón. La precisión normal de los ordenadores (la llamada precisión simple) acostumbra a estar limitada a siete cifras significativas: una vez que la máquina redondea el cálculo se imprimen seis cifras. Para seguir con la expresión del voladizo una vez rebasado el millón de fichas hay que recurrir a la doble precisión (habitualmente se trata de una precisión de 14 cifras significativas, imprimiéndose 13 cifras tras el redondeo). El cálculo con doble precisión y un gran número de fichas es lento. Y, aún con esta precisión, las funciones aritméticas del ordenador proporcionan sólo resultados aproximados.

Steve Wallin, de Laramie, Wyoming, me ha mostrado una técnica rápida para determinar con aproximación el voladizo. Como referencia emplea las 1674 piezas necesarias para el voladizo de cuatro longitudes. Entonces, el número de fichas necesarias para un voladizo dado (expresado en longitudes de ficha) es igual a 1674 multiplicado por la exponencial de dos veces la diferencia entre el voladizo deseado y cuatro longitudes. Por ejemplo, si nuestro objetivo es un voladizo de 10 longitudes, hay que restar 4 de 10, multiplicar por 2 y hallar la exponencial de este resultado. Por último, se multiplica por 1674 y el resultado es el número de fichas que se necesitan.

Otro acertijo. ¿Cuál es la longitud máxima a la que puede hacerse volar una ficha de dominó respecto al borde de una mesa cuando se dispone únicamente de tres fichas? En la figura 12 se ofrecen dos soluciones. De acuerdo con la primera, el centro de masa de la ficha de abajo se encuentra exactamente sobre el borde. La segunda se coloca sobre el extremo interior de la anterior, de suerte que su centro de masa esté exactamente encima del borde de la misma. Luego, la tercera se sitúa sobre el borde exterior de la primera. Así, el centro de masa de la combinación se encontrará exactamente encima del borde de la mesa y el peso resultante no producirá momento alguno.

Una solución mejor es girar la primera pieza hasta que la diagonal de dos esquinas esté perpendicular al borde de la mesa. La segunda se instala equilibrándola sobre una de las esquinas más separadas del borde. La tercera se equilibra en torno a su centro de masa situado sobre la esquina opuesta. Aquí también el centro de la masa de la combinación se encontrará en el borde de la mesa y el conjunto será estable. Con esta disposición, la tercera ficha estará más lejos del borde que con la anterior, ya que la diagonal de la ficha es más larga que su altura. Pruébese a colocar la tercera ficha de pie sobre uno de los cantos cortos. El centro de masa se hallará en la misma posición que antes con respecto a la mesa, pero la cara más cercana a ésta se encontrará más lejos del borde.

Libros

Genética y cultura, física española contemporánea, estructuralismo de Stegmüller y reacciones químicas

J.-R. Lacadena, R. Pascual, J. A. López y J. Font

La Diversidad Humana, por Richard Lewontin. Biblioteca Scientific American; Prensa Científica, S. A., Editorial Labor. Barcelona, 1984. No hay duda que Richard Lewontin tiene un bien merecido prestigio por su rigor científico en el campo de la genética de poblaciones y evolutiva, siendo su especialidad el estudio de la diversidad genética en poblaciones naturales. También son bien conocidas su –me atrevería a decir– hipersensibilidad y acerada crítica (a veces, incluso, agresiva) en temas relacionados con la genética humana y su proyección social. Esta preocupación suya le ha llevado, por ejemplo, a participar como profesor en cursos sobre aspectos sociales y políticos de la biología, organizados por la Universidad de Harvard. Así, se comprende que un editor anónimo le insistiera "en que utilizara cuidadosamente las palabras, ciñéndose a los hechos", como él mismo reconoce, agradecido, en el prefacio de la obra que nos ocupa. A pesar del esfuerzo que sin duda ha hecho Lewontin para ser comedido, algunas veces, no obstante, tiene algunos ramalazos sociopolíticos (vgr.: "... los ingleses e irlandeses que les arrebataron Australia [a los aborígenes]"; pág. 7).

El objeto de este libro sobre *La diversidad humana* –publicado originalmente en inglés en 1982 y traducido muy correctamente por Joandomènec Ros– es "desacreditar el cándido determinismo [genético] que con tanta frecuencia ha pasado por ciencia y para proporcionar un atisbo de la complejidad real que asoma detrás de la variación humana". Quizás, a mi juicio, ese interés decidido en "desacreditar" las teorías simplistas deterministas hace que los dedos se le antojen huéspedes y, en diversas ocasiones a lo largo del libro, podría decirse que riza el rizo al tratar el tema de la interacción genotipo-ambiente. La conclusión repetida a la que llega al analizar distintos aspectos de la diversidad física y, por supuesto, psíquica humana es lo que podríamos llamar un "agnosticismo genético": una especie de sólo sé que no se puede saber nada sobre el componente genético de multitud de caracteres, no sólo del comportamiento en particular sino también del desarrollo en general.

El libro –muy bien presentado en cuanto a tipografía, gráficos y fotografías se refiere– está estructurado en los nueve capítulos siguientes: 1) Variedad humana, 2) Genes, ambiente y organismo, 3) Diversidad genética simple, 4) Base genética de los polimorfismos simples, 5) Así proceden los genes, 6) Variación continua, 7) Rasgos mentales, 8) Diversidad entre grupos, y 9) Evolución de la diversidad humana. En cuatro capítulos se acompañan algunas páginas adicionales de composiciones fotográficas que no aportan nada de valor al contenido del libro, salvo hacerlo más atractivo al posible comprador que lo hojee en una librería.

¿A quién va dirigido el libro? Esta pregunta me la he hecho varias veces a lo largo de su muy interesante lectura. Del estilo desenfadado utilizado por Lewontin y del propio prefacio ("... un grupo de personas desarrollamos el plan de edición de una serie de libros que ilustraran principios científicos básicos...") podría deducirse que el libro va dirigido a una gran masa de lectores cultos interesados en problemas biológicos con proyección social; por ejemplo, psicólogos y sociólogos, además de biólogos. Mi impresión, sin embargo, es que, para poder sacar todo el provecho a la calidad del mensaje que encierra, es necesario tener una cierta base de conocimiento genético. Ello es especialmente cierto para hacer una lectura comprensiva, por ejemplo, de los capítulos 2 (Genes, ambiente y organismo) y 6 (Variación continua), mientras que el tratamiento dado a otros capítulos –como el 4 (Base genética de los polimorfismos simples) y el 5 (Así proceden los genes)– resulta, en comparación, demasiado elemental, como dirigidos a lectores con pocos conocimientos biológicos; pero si ello fuera así, es posible entonces que este tipo de lectores no fuera capaz de comprender a fondo el contenido de los restantes capítulos.

La tesis que desarrolla Lewontin a lo largo de la obra trata de demostrar que la verdad es más compleja y menos espectacular que lo que cabría esperar entre los extremos que suponen una postura genéticamente determinista –para la que todas las diferencias entre las personas son reducibles en último término a diferencias entre sus genes– y una postura conductista para la que las diferencias psíquicas o de comportamiento no son más que simples respuestas aprendidas ante la repetición de los estímulos. Aunque es obvio que Lewontin no es conductista, sin embargo, a veces, su forma de decir las cosas debido a su rigor crítico puede crear situaciones que puedan parecer ambiguas para un lector no avezado en el tema. Podría decirse que en la última frase del libro está resumida toda la tesis de su obra: concluye, parafraseando a Dobzhansky, "nada en la evolución humana tiene sentido si no es a la luz de la historia".

En resumen, se trata de un buen libro que, bajo una apariencia de divulgación, merece la pena leerse despacio para poder asimilarlo bien. (J.-R. L.)

SU(3) × SU(2) × U(1) and Beyond. Proceedings of the XIIIth GIFT International Seminar on Theoretical Physics and Xth International Winter Meeting on Fundamental Physics. Dirigido por A. Ferrando, J. A. Grifols y A. Méndez. Editorial World Scientific; Singapore, 1983. Se compilan aquí las actas de la reunión científica que tuvo lugar en La Masella (Gerona) desde el 28 de enero hasta el 6 de febrero de 1982. Excepcionalmente se realizó de manera conjunta el Seminario Internacional que anualmente organiza el Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT) y el encuentro, también anual, de los físicos que trabajan en el dominio de las altas energías. El GIFT agrupa físicos teóricos de distintas especialidades, aunque fundamentalmente de partículas elementales; anualmente organiza un seminario internacional donde desarrollar algún tema de investigación candente, al objeto de mantener a sus miembros en la onda de las corrientes de investigación internacionales.

El volumen se divide en dos partes, una teórica y otra experimental, con el denominador común de la situación de la física de partículas elementales. Como indica el título, los temas versa-

ron sobre las actuales creencias básicas de la física. La teoría electrodébil que engloba y unifica la teoría del campo electromagnético de Maxwell y las interacciones nucleares débiles responsables, entre otras cosas, de la desintegración beta; a esta teoría se refiere el $SU(2) \times U(1)$ del título, ya que se trata de una teoría de aforo ("gauge") basada en el grupo $SU(2) \times U(1)$. Por su lado, SU(3) alude a la cromodinámica cuántica (QCD), la teoría de quarks y gluones basada en el grupo SU(3) de color que, por primera vez, nos proporciona una buena teoría de las interacciones nucleares fuertes. Digamos finalmente que el "Beyond" del título remite a las perspectivas futuras, modificadas ya hoy, pues en un campo como el que se analiza el intervalo de dos años que nos separa de febrero de 1982 es un período enorme; más aún, si en el entretanto se ha producido un suceso de la importancia del descubrimiento de los bosones intermedios Z y W, que constituyen las piezas claves de la teoría electrodébil.

En la parte experimental de la obra se recoge la situación de los ensayos realizados en el anillo de almacenamiento "Petra" del laboratorio DESY de Hamburgo, donde colisionan electrones y positrones. La puesta a punto realizada por Fernando Barreiro, físico español de la Universidad de Siegen, refleja la situación del momento. F. Eisele, de la Universidad de Dortmund, analiza las comprobaciones de la cromodinámica cuántica y pone de manifiesto la verificación experimental de algunos aspectos esenciales de las teorías de aforo no abelianas, como la interacción entre tres gluones. La sección acaba con un análisis de la situación de los experimentos encaminados a detectar la desintegración del protón.

Entre las predicciones de las teorías de la gran unificación se cuenta la relativa a la desintegración del protón, con una vida media del orden de los 10^{31} años (10^{22} veces mayor que la edad del universo). En 1982 se empezaba a disponer de algunos resultados experimentales negativos (como los actuales), que son analizados por L. R. Sulak, de la Universidad de Michigan, participante, él mismo, en uno de esos importantes ensayos.

La parte teórica de la obra recoge 10 colaboraciones de otros tantos físicos españoles y extranjeros. Se encuentran en ella desde introducciones teóricas a temas actuales, así la relativa a las teorías de aforo en retículos de A. González Arroyo, hasta puestas a punto de trabajos muy recientes, verbigracia, la situación en aquel momento de los resultados de los análisis de la QCD en retículos. Sin olvidar la interpretación de resultados experimentales: contraste de las teorías electrodébiles y de la cromodinámica cuántica con la situación experimental, detección de glubolas, etcétera.

De especial interés son las aportaciones de D. V. Nanopoulos sobre la gran unificación y las supersimetrías. Se trata de una de las primeras revisiones asequibles de un tema que ha sufrido un desarrollo espectacular. En este campo entra la contribución de M. Quirós. Completan la parte teórica algunos análisis, entre los que destacan el de la ruptura dinámica de simetrías y la alternativa del hipercolor, hoy abandonada, y las perspectivas de los modelos compuestos de quarks y leptones.

En definitiva, se trata de un buen libro que debe figurar en todas las bibliotecas especializadas. Sobrepasa la capacidad de quien aspira a introducirse en estas materias, pero constituye una excelente síntesis que refleja la situación de los conocimientos en esta zona fronteriza de la física a principios de 1982. La edición ha sido preparada por Antonio Ferrando, físico experimental de partículas de la Junta de Energía Nuclear, y por J. A. Grifols y A. Méndez, profesores del Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Barcelona, que, con Ferrando, fueron los organizadores del encuentro (R. P.)

ESTRUCTURA Y DINÁMICA DE TEORÍAS, por W. Stegmüller. Ariel; Barcelona, 1983. Con esta edición, Ariel completa la publicación en castellano del segundo volumen de la extensa obra de Stegmüller *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*. Este segundo volumen, editado originalmente en 1970 (parte primera: *Theorie und Erfahrung*) y 1973 (parte segunda: *Theorienstrukturen und Theoriendynamik*) por Springer Verlag con el título genérico de *Theorie und Erfahrung*, ha sido publicado íntegramente por Ariel en su colección "Ciencia de la Ciencia" con los títulos respectivos de *Teoría y Experiencia* y de *Estructura y Dinámica de Teorías*. No sólo el esfuerzo editorial es digno de reseñarse, también se ha de señalar la pulcra traducción de ambos títulos por C. Ulises Moulines, en la misma línea de trabajo que nuestro autor. No cabe duda de que la proximidad filosófica de autor y traductor ha tenido que ver en la calidad de la versión castellana; si bien ésta pueda ser un tanto libre a veces, como al traducir *Rationalitätslücke* por "fisura arracional" (¿por qué no decir del modo usual "laguna de racionalidad"?), siempre permanece fiel al sentido original de términos y expresiones.

El libro comentado, destinado principalmente a profesores y estudiantes interesados en filosofía de la ciencia, es de lectura fácil y amena. Su contenido se inscribe en la concepción estructuralista de las teorías; entendiendo por tal el enfoque de las teorías científicas que se ha desarrollado, fundamentalmente desde los años 70, con los trabajos de P. Suppes, J. D. Sneed y el propio Stegmüller.

De acuerdo con la concepción estructuralista, también conocida como concepción no-enunciativa a propuesta del propio Stegmüller, las teorías de la física matemática han de reconstruirse formalmente como estructuras matemáticas de diversos tipos con ámbitos de aplicación empírica integrados por modelos de dichas estructuras. De este modo, una teoría de la física matemática consta, por un lado, de una parte formal constituida por sus estructuras teóricas, sus estructuras no-teóricas y determinadas leyes donde se ponen en relación los conceptos de ambos tipos de estructuras; y, por otro lado, consta también de una parte empírica formada por el conjunto de aplicaciones propuestas para las leyes de la teoría. La relación entre las partes formal y empírica de una teoría, definida a través de un predicado conjuntista que afirma hipotéticamente de ciertos sistemas empíricos que son modelos de las estructuras teóricas, integraría el contenido empírico concreto de cada teoría.

Así pues, frente al reconstruccionismo tradicional del empirismo lógico, en esta concepción no se trata de representar formalmente las teorías (entendidas como clases de enunciados) a través de criterios semánticos y técnicas metamatemáticas de axiomatización; sino, por el contrario, se propone el uso de la teoría informal de conjuntos y de criterios pragmáticos de determinación del significado para caracterizar las teorías de un modo no lingüístico. Adicionalmente, se ha conseguido rigorizar conceptos pragmáticos intuitivamente necesarios para toda descripción fidedigna de la ciencia; como, por ejemplo, es el caso de disponer de una teoría o de la determinación paradigmática del alcance empírico de una teoría.

Este es, pues, un libro básico tanto en el marco de la propia concepción estructuralista como para adquirir una comprensión adecuada del curso que la filosofía de la ciencia ha seguido recientemente con autores como T. S. Kuhn o I. Lakatos. Con este texto puede de-

cirse que se superan viejas polémicas entre formalistas y pragmatistas a través de la "formalización de la pragmática". Ahora bien, sólo se recurre a categorías psico-sociológicas de descripción cuando la consideración realista de la ciencia no deja más alternativa. Es un hecho que existen comunidades científicas con productos que no pueden aislarse de aquéllas para ser diseccionados en el laboratorio del empirista lógico. Con ello sólo dispondríamos de directrices metodológicas, de modelos ideales acerca de cómo debería ser la ciencia; ni siquiera obtendríamos información sobre la viabilidad práctica de nuestras propuestas normativas.

El libro se divide en dos grandes bloques, correspondientes a los capítulos VIII y IX de *Theorie und Erfahrung*. En el capítulo VIII, "La estructura de las teorías físicas maduras según Sneed", Stegmüller desarrolla y precisa el contenido de la obra clave en la concepción estructuralista: *The Logical Structure of Mathematical Physics*, de J. D. Sneed. Aborda temas tan complejos como el de la teoricidad o el de la determinación extensional del significado de los términos descriptivos. Tras una introducción detallada al procedimiento de axiomatización estructuralista, Stegmüller plantea la relativización de la teoricidad respecto de cada teoría concreta; y propone, siguiendo a Sneed, la sustitución de la dicotomía "observacional/teórico" para términos descriptivos por la más realista de "teórico/no-teórico" respecto de una teoría dada.

Una vez configurada dicha dicotomía a través de una triple modificación del método de F. P. Ramsey para eliminar los términos teóricos, Stegmüller dispone ya del instrumental necesario para la representación formal del contenido empírico de una teoría, cosa que pone a prueba en la sección sexta con la mecánica clásica de partículas. A continuación se acomete una reconstrucción estructuralista de las teorías físico-matemáticas con el nuevo aparato conceptual, formalizando además algunas relaciones interteóricas, como las de equivalencia y reducción. Hay que puntualizar que la aceptación de este capítulo VIII no involucra el reconocimiento de los resultados que se presentan en el capítulo siguiente; aunque no *vice versa*.

En el capítulo IX ("Dinámica de teorías: el desarrollo de la 'ciencia normal' y la suplantación de teorías en las 'revoluciones científicas'") Stegmüller formaliza alguna de las principales nociones intuitivas de Kuhn. Estas se presentan de un modo riguroso, aunque tomando en consideración el irreducible componente pragmático que las caracteriza. Después de una exposición de la filosofía de la ciencia kuhniana y las principales críticas que ha tenido que afrontar, emprende el análisis de la determinación paradigmática del campo de aplicación de una teoría, la inmunidad de las teorías frente a falsadores potenciales y la suplantación "revolucionaria" de teorías. La obra concluye con una defensa del holismo y algunas consideraciones formales sobre el falsacionismo sofisticado que desarrolla Lakatos como metodología de programas de investigación.

Con respecto a uno de los problemas centrales de este capítulo, el planteado por la presunta irracionalidad de las revoluciones científicas, Stegmüller ex-

presa su confianza respecto al perfeccionamiento de un concepto estructuralista de reducción que ponga fin a la principal controversia que plantea la obra de Kuhn: la fisura arracional que media entre teorías inconmensurables. No se puede decir que el optimismo de Stegmüller fuese infundado: a partir de principios de los 80 se adelanta un nuevo concepto estructuralista de reducción, la reducción aproximativa, para dar cuenta de los casos especialmente graves de inconmensurabilidad. En esta línea se encaminan buena parte de los desarrollos recientes en esta concepción de las teorías, principalmente debidos a D. Mayr y el propio Moulines. Junto a estos autores hay que mencionar también los recientes trabajos en medición y teoricidad de W. Balzer, estrecho colaborador de Sneed.

Con más de diez años, prácticamente insignificantes si el texto se enmarcara en la concepción tradicional de las teorías, el libro de Stegmüller contiene algunas partes ya superadas por trabajos posteriores. Como, por ejemplo, las relativas a la introducción formal de los distintos tipos de modelos de una teoría, la especialización de leyes o el tratamiento de la relación de reducción. Se dejan problemas abiertos de los que ya se ha dado cuenta; si bien otros quedan aún pendientes. Con todo, el libro conserva su vigencia y es sin duda alguna un punto de referencia obligado para cualquiera que intente algo más que una aproximación superficial al estructuralismo. (J. A. L.)

MODELLING OF CHEMICAL REACTION SYSTEMS, dirigido por K. H. Ebert, P. Deuflhard y W. Jäger. Springer-Verlag; Berlín, 1981. El conocimiento exacto de cómo ocurren y transcurren las reacciones químicas corresponde a una investigación lenta y complicada. La película de los distintos pasos, procesos, características y energía de los intermedios o especies de vida corta, película que nos lleva de los productos iniciales a los finales, recibe el nombre de mecanismo de una reacción química. Para llegar a proponer un determinado mecanismo son necesarios muchos datos: análisis preciso de los productos finales, identificación de los intermedios reactivos mediante técnicas diversas, por ejemplo espectroscópicas, seguimiento de la reacción por etiquetado isotópico y estudios cinéticos. El libro que comentamos se refiere precisamente a la obtención de datos cinéticos y su tratamiento para llegar a definir las distintas constantes de velocidad de las reacciones elementales que constituyen la reacción química global. Se trata de los *Proceedings* de un seminario internacional celebrado en Heidelberg durante el mes de septiembre de 1980 y editados en la serie de Springer de química física con el número 18.

Durante mucho tiempo sólo han podido obtenerse datos cinético-químicos para reacciones muy sencillas o simples, la mayor parte de ellas de escasa importancia práctica. La disponibilidad de computadoras rápidas ha proporcionado nuevas oportunidades para el desarrollo de la cinética química. Los sistemas químicos de interés suelen ser muy complejos. Constan de un gran número de diferentes reacciones químicas elementales, la mayor parte de las cuales poseen constantes de velocidad muy distintas, con valores divergentes en varios órdenes de magnitud y con procesos de transporte que complican el mecanismo. La derivación, por tanto, del "verdadero" mecanismo puede llegar a ser muy onerosa. Piénsese, por ejemplo, en una reacción de combustión o en una polimerización, procesos ambos de una importancia práctica capital. Sin embargo, sólo frente a un conocimiento exacto del mecanismo químico puede actuarse sobre la reacción o diseñar reactores adecuados de modo que el aprovechamiento de la misma se maximice, ya sea a través del calor de reacción (caso de la combustión), ya sea por mejora del producto final (caso del polímero).

Para el tratamiento de los datos cinéticos es necesaria la aplicación de métodos matemáticos elaborados y complicados: teoría de las perturbaciones, teoría de grafos, análisis sensitivo, etcétera. Para involucrar a matemáticos, físico-químicos e ingenieros químicos en el tema que comentamos es por lo que se llevó a cabo el seminario que el presente volumen recoge. No se trata de un libro estructurado y desarrollado por un solo autor, sino que es una recopilación fidedigna de las comunicaciones presentadas en el seminario, cada una de las cuales constituye un capítulo del libro. Sin embargo, se definen claramente tres partes. En la primera, se cubren los diferentes tipos de tratamiento matemático de los sistemas químicos en reacción. En la segunda, se indican las aplicaciones físico-químicas y, en la tercera, las aplicaciones de ingeniería química. Cincuenta y un autores se reparten la firma de los 27 artículos, comunicaciones o capítulos que componen el seminario, correspondiéndole al profesor Noyes el resumen final.

La primera parte es quizá la más interesante por aportar la base matemática para el estudio de sistemas cinéticos complejos. Tres artículos se refieren a la solución de ecuaciones diferenciales complicadas, bien mediante técnicas de computación con la introducción de nuevos programas (por ejemplo, el LARKIN), bien mediante técnicas de perturbación singular equivalentes al QSSA (aproximación del estado cuasi-estacionario). Otros artículos bucean en la clasificación de las redes de reacción mediante la teoría de grafos. Distintos procedimientos de simulación son comentados en varios capítulos de esta primera parte, que en total incluye diez trabajos sobre métodos o tratamientos matemáticos.

Un número importante de comunicaciones sobre modelos reaccionales de procesos químicos complicados se presentan en la segunda parte. La naturaleza de los sistemas químicos escogidos varía considerablemente desde la degradación de polímeros hasta la pirólisis de hidrocarburos. Los procesos de combustión se abordan desde diferentes puntos de vista y se aporta un nuevo modelo para reacciones heterogéneas. También encontramos dos trabajos sobre el famoso sistema de Belousov-Zhabotinskii. Sin embargo, nada se dice de la química de la atmósfera y los osciladores químicos, a pesar de que fueron objeto de alguna comunicación durante el seminario y de su gran interés. Tampoco el seminario hizo ningún esfuerzo por debatir las múltiples complejidades bioquímicas de los organismos vivos.

Aunque la parte tercera, la más corta, sólo incluye seis comunicaciones, pone al alcance del lector temas de especial actualidad; así, el tratamiento dinámico de los reactores de polimerización, la modelación y simulación de la reacción química industrial o la multiplicidad del estado estacionario en sistemas químicos reaccionales.

En conjunto, el libro es interesante para el estudioso de la cinética química, es decir, para el investigador especializado, pero pueden sacar provecho también los matemáticos que busquen aplicación a sus teorías. No es un libro fácil de leer. Cada "capítulo" es un trabajo de investigación desarrollado en un promedio de catorce páginas. Al final de cada capítulo se da una amplia bibliografía. Nadie espere encontrar las bases de cómo diseñar un mecanismo químico, pero los cultivadores de los estudios cinéticos hallarán, por contra, reacciones químicas complejas. (J. F.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EFECTOS CLIMATICOS DE UNA GUERRA NUCLEAR

NUCLEAR WINTER: GLOBAL CONSEQUENCES OF MULTIPLE NUCLEAR EXPLOSIONS. R. P. Turco, O. B. Toon, T. P. Ackerman, J. B. Pollack y Carl Sagan en *Science*, vol. 222, n.° 4630, págs. 1283-1292; 23 de diciembre de 1983.

NUCLEAR WAR AND CLIMATIC CATASTROPHE: SOME POLICY IMPLICATIONS. Carl Sagan en *Foreign Affairs*, volumen 62, n.° 2, págs. 257-292; invierno, 1983/1984.

GLOBAL ATMOSPHERIC EFFECTS OF MASSIVE SMOKE INJECTIONS FROM A NUCLEAR WAR: RESULTS FROM GENERAL CIRCULATION MODEL SIMULATIONS. Curt Covey, Stephen H. Schneider y Starley L. Thompson en *Nature*, vol. 308, n.° 5954, págs. 21-25; 1 de marzo de 1984.

BANDEO DE CROMOSOMAS

THE MECHANISM OF C- AND G- BANDING OF CHROMOSOMES. D. E. Comings, E. Avelino, T. A. Okada y H. E. Wyandt en *Experimental Cell Research*, vol. 77, págs. 469-493; 1973.

LONGITUDINAL DIFFERENTIATION OF CHROMOSOMES. T. C. Hsu en *Annual Review of Genetics*, vol. 7, págs. 153-176; 1974.

MOLECULAR STRUCTURE OF HUMAN CHROMOSOMES. J. J. Yunis. Academic Press, 1977.

THE EUKARYOTIC CHROMOSOME. C. J. Bostock y A. T. Sumner. North Holland Publishing Company, 1978.

OBJETO SUPERLUMINOSO EN LA GRAN NUBE DE MAGALLANES

CENTRAL OBJECT OF THE 30 DORADUS NEBULA, A SUPERMASSIVE STAR. Joseph P. Cassinelli, John S. Mathis y Blair D. Savage en *Science*, vol. 212, n.° 4502, págs. 1497-1501; 26 de junio de 1981.

THE NATURE OF R136A, THE SUPERLUMINOUS CENTRAL OBJECT OF THE 30 DORADUS NEBULA. Blair D. Savage, Edward L. Fitzpatrick, Joseph P. Cassinelli y Dennis C. Ebbets en *The Astrophysical Journal*, vol. 273, n.° 2, parte 1.ª, págs. 597-623; 15 de octubre de 1983.

THE MOST LUMINOUS STARS. Roberta M. Humphreys y Kris Davidson en *Science*, vol. 223, n.° 4633, págs. 243-249; 20 de enero de 1984.

PROTEINAS DE ONCOGENES

TRANSFORMING GENE PRODUCT OF ROUS SARCOMA VIRUS PHOSPHORYLATES TYROSINE. Tony Hunter y Bartholomew M. Sefton en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 77, n.° 3, págs. 1311-1315; marzo, 1980.

FUNCTIONS AND ORIGINS OF RETROVIRAL TRANSFORMING GENES. J. Michael Bishop y Harold Varmus en *RNA Tumor Viruses*, dirigido por R. Weiss, N. Teich, H. Varmus y J. Coffin. Cold Spring Harbor Laboratory Monograph Series, 1982.

REGULATION OF CELL GROWTH AND TRANSFORMATION BY TYROSINE-SPECIFIC PROTEIN KINASES: THE SEARCH FOR IMPORTANT CELLULAR SUBSTRATE PROTEINS. Jonathan A. Cooper y Tony Hunter en *Current Topics in Microbiology and Immunology*, vol. 107, págs. 125-161; 1983.

EL TEMPLO MAYOR DE TENOCHTITLAN

THE BASIN OF MEXICO: ECOLOGICAL PROCESSES IN THE EVOLUTION OF CIVILIZATION. William T. Sanders, Jeffrey R. Parsons y Robert S. Santley. Academic Press, 1979.

THE TEMPLO MAYOR OF TENOCHTITLÁN: ECONOMICS AND IDEOLOGY. Eduardo Matos Moctezuma en *Ritual Human Sacrifice in Mesoamerica*, dirigido por Elizabeth H. Boone. Dumbarton Oaks, 1984.

FIBRAS OPTICAS EN VEGETALES

PLANTS AND THE DAYLIGHT SPECTRUM: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE BRITISH PHOTOBIOLOGY SOCIETY, LEICESTER, 5-8 JANUARY, 1981. Dirigido por H. Smith. Academic Press, 1981.

FIBER OPTIC PLANT TISSUES: SPECTRAL DEPENDENCE IN DARK-GROWN AND GREEN TISSUES. D. F. Mandoli y W. R. Briggs en *Photochemistry and Photobiology*, vol. 39, págs. 419-424; 1984.

MANIPULACION MECANICA DE PARTES ALEATORIAMENTE ORIENTADAS

DETERMINING SHAPE AND REFLECTANCE USING MULTIPLE IMAGES. B. K. P. Horn, R. J. Woodham y W. M. Silver. M.I.T. A.I. Laboratory, Memo 490; agosto, 1978.

A ROBOT SYSTEM WHICH ACQUIRES CYLINDRICAL WORKPIECES FROM BINS. Rober B. Kelley, John R. Birk, Henrique A. S. Martins y Richard Tella en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-12, n.° 2, págs. 204-213; marzo/abril, 1982.

REPRODUCCION COOPERATIVA DEL PICAMADEROS DE LAS BELLOTAS

SOCIAL ORGANIZATION AND BEHAVIOR OF THE ACORN WOODPECKER IN CENTRAL COASTAL CALIFORNIA. Michael H. MacRoberts y Barbara R. MacRoberts. The American Ornithologists' Union, Ornithological Monographs n.° 21; Allen Press, 1976.

AVIAN COMMUNAL BREEDINGS SYSTEMS. Jerram Brown en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 9, págs. 123-155; 1978.

COOPERATIVE BREEDING STRATEGIES AMONG BIRDS. Stephen Emlen y Sandra Vehrencamp en *Perspectives in Ornithology: Essays Presented for the Centennial of the American Ornithologists' Union*, dirigido por Alan Brush y George A. Clark. Cambridge University Press, 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

COMPUTATION: FINITE AND INFINITE MACHINES. Marvin L. Minsky. Prentice-Hall, Inc., 1967.

MÁQUINAS DE TURING. John E. Hopcroft en *Investigación y Ciencia*, n.° 94, págs. 8-19; julio, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

LEANING TOWER OF LIRE. Paul B. Johnson en *American Journal of Physics*, vol. 23, n.° 4, pág. 240; abril, 1955.

DOMINO "CHAIN REACTION". Lorne A. Whitehead en *American Journal of Physics*, vol. 51, n.° 2, pág. 182; febrero, 1983.